



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 41 24 654 A 1**

⑤ Int. Cl.⁵:
G 05 D 1/02
G 06 F 15/48
B 60 K 31/00
B 62 D 6/00

⑳ Aktenzeichen: P 41 24 654.3
㉔ Anmeldetag: 25. 7. 91
㉕ Offenlegungstag: 28. 1. 93

DE 41 24 654 A 1

㉚ Anmelder:

Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den
Bundesminister der Verteidigung, dieser vertreten
durch den Präsidenten des Bundesamtes für
Wehrtechnik und Beschaffung, 5400 Koblenz, DE

㉚ Erfinder:

Dickmanns, Ernst D., Prof. Dr.-Ing., 8011 Hofolding,
DE; Mysliwetz, Birger, Dr.-Ing., 8130 Starnberg, DE

㉙ Verfahren zur kontinuierlichen und automatischen Fahrzeugorientierung auf einer Fahrbahn

㉙ Es wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches modellierte
räumlich-geometrische und zeitlich-dynamische Aspekte ei-
ner monokular erfaßten Szene und ihre Veränderungen
mittels rekursiver Schätzverfahren bewertet, um so die
Fahrzeugsituation relativ zur Fahrbahn sowie den Fahrbahn-
verlauf zur Erzeugung von Fahrzeugsteuerdaten zu erfassen.

DE 41 24 654 A 1

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur kontinuierlichen und automatischen Fahrzeugorientierung auf einer Fahrbahn mit einem bilderzeugenden System und einer computerisierten Bildauswertung zur Erzeugung von Fahrzeugsteuerdaten.

Aufgrund einer wachsenden Verkehrsleistung ist eine immer stärkere Transportkapazitätsauslastung von Verkehrswegen unvermeidlich.

Derzeit stößt diese Erweiterung jedoch auf eine Begrenzung, die durch den Menschen wegen seiner psychischen und physischen Möglichkeiten als Fahrzeugführer vorgegeben ist.

Als Ausweg bietet sich der teilweise oder vollständige Ersatz des Fahrzeugführers durch eine automatische Fahrzeugführung an, die auch schon unter den gegenwärtigen Bedingungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Komfortsteigerung wünschenswert wäre.

Zur Realisierung einer automatischen Fahrzeugführung ist es notwendig, wenn sich der Ersatz des Menschen nicht nur auf eine bloße Geschwindigkeitsregelung beschränken soll, über ein System zu verfügen, welches die selbstständige Orientierung des Automaten auf der Fahrbahn ermöglicht.

Bisher zu diesem Zweck geschaffene Einrichtungen sind hierzu nur sehr eingeschränkt fähig.

So ist z. B. ein Automat zur Fahrzeuglenkung aus dem EUREKA-Projekt "Prometheus" bekannt.

Diese Einrichtung weist zur Orientierung und Lenkung des Fahrzeuges auf der Fahrbahn eine Kamera auf, die so ausgerichtet ist, daß sie die rechte Fahrbahnbegrenzung anvisiert.

Aus dem erzeugten Bild wird mittels eines computerisierten Auswerteverfahrens versucht, nach Farbkontrasten eine Leitspur zu ermitteln.

Die Spur dient dann als Bezug für die Fahrzeugsteuerung.

Abgesehen von der Möglichkeit, ein Kraftfahrzeug schienenfahrzeuggleich auf einer Straße führen zu können, muß als hauptsächlicher Nachteil dieser Vorgehensweise festgestellt werden, daß es so nicht möglich ist, sich am tatsächlichen Fahrbahnverlauf zu orientieren.

Eine vorausschauende Bewertung des weiteren Straßenverlaufs ist nicht möglich.

Des weiteren führen Kontraste, die einen Eindruck einer Spur verursachen, aber nicht in Fahrbahnrichtung verlaufen, bzw. etwaige Auslöschungen des vom System z. B. als Spur aufgefaßten Randstreifens durch Bremspuren, Schlagschatten etc., zu nicht akzeptablen Funktionsausfällen.

Eine andere diskutierte Einrichtung zur automatischen Fahrzeuglenkung trägt die Bezeichnung "Train".

Zur Sicherstellung einer fortwährend zuverlässigen Lenkung ist es bei ihr vorgesehen, die Kamera und die zugehörige Bildauswertung gegen einen Stromabnehmer, der zugleich ein seitliches Führungssignal erzeugen kann, auszutauschen.

Dem Vorteil der exakten zuverlässigen Fahrzeuglenkung steht hier allerdings der erhebliche Nachteil gegenüber, nur auf Straßen zu funktionieren, die über eine entsprechende Ausrüstung verfügen.

Wegen der erwähnten Unzulänglichkeiten der bisher in Realisierung bzw. Diskussion befindlichen Systeme zur automatischen Fahrzeugführung stellt sich die Aufgabe, ein Verfahren zu schaffen, welches implementiert in eine Einrichtung zur automatischen Fahrzeugführung, diese in die Lage versetzt, monokulare Bildfolgen einer am Fahrzeug montierten Kamera modellgestützt zur räumlichen Fahrbahnverlaufserfassung zu interpretieren.

Gemäß der Erfindung wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß von einer Fernsehkamera, die möglichst hoch über der Fahrbahn am Fahrzeug aufgehängt ist, ständig digitalisierte Bildfolgen im Videotakt an ein Rechnersystem mit einem Programm zur speziellen verfahrensgemäßen Ausgestaltung der Signalverarbeitung und Interpretation im Fahrzeug übertragen werden.

Im Verfahren werden generische Straßenmodelle und einfache generische dynamische Modelle für die Fahrzeugbewegung ausgenutzt, um bisher enthaltene Ergebnisse der Fahrbahn- und Fahrzeugrelativlage — Erkennung zur Auswertung des nächsten Bildes verwenden zu können.

Hierzu werden drei Teilmodelle kombiniert.

Monokulare Bilddaten nur des letzten Bildes werden mit rekursiven Schätzverfahren zur Bestimmung der Straßenparameter und des eigenen Relativzustands ausgewertet.

Dadurch entsteht im Rechner eine räumliche Vorstellung des aktuellen Straßenverlaufs im Vorausschaubereich.

In vorteilhafter Weise gelingt dabei eine Umsetzung von Veränderungen im Bild in regelungsorientierte Zustandsgrößen innerhalb nur eines Verfahrenszyklus.

Im folgenden wird das Verfahren zur kontinuierlichen und automatischen Orientierung auf einer Fahrbahn näher erläutert in der folgenden Anlage.

1. Modellgestützte Bildfolgen-Interpretation zur räumlichen Fahrbahnverlaufserfassung

1.1 Die modellierten Fahrzeug- und Fahrbahn-Freiheitsgrade

Die Modellierung stellt das zur "höheren" Interpretation nötige, meist anwendungsspezifische, Vorwissen über eine Szene dar. Erst hiermit wird eine Umsetzung vom "anonymen" Bildsignal in problemorientierte Bedeutung möglich.

Der 4D-Ansatz zur Bildfolgeninterpretation nutzt die Modellierung räumlich-geometrischer und zeitlich-dynamischer Aspekte einer Szene und ihrer Veränderungen. Diese raum/zeitliche Modellvorstellung leistet in Kombination mit rekursiven Schätzverfahren in der hier beschriebenen Anwendung zur Straßenfahrzeugführung sowohl die Erkennung des fahrzeugeigenen Lateralzustandes relativ zur Fahrbahn, als auch die Erfassung

des räumlichen Fahrbahnverlaufes aus der 2D-Bildfolge während des Entlangfahrens. Hierfür existieren zwei schwach gekoppelte dynamische Teilsysteme: das der Fahrzeug-Querdynamik sowie der Fahrbahnkrümmungsdynamik.

Die Struktur des Differentialgleichungssystems, das die Fahrzeugseitenbewegung bzw. die Fahrbahnkrümmungsdynamik beschreibt, die geometrischen Modell- und Abbildungsparameter, das eingesetzte Zustands-schätzverfahren (Kalman Filter) sowie die zugehörigen Kovarianzen der Meßfehler und Prozeßstörungen stellen "analytisches Wissen" [Isermann u. Nold, 88] über den optisch zu erfassenden (und in der Folge zu steuernden) Prozeß "Entlangfahren an einer Straße" dar.

Die wesentlich modellierten — und damit erfassbaren — Freiheitsgrade und ihre Auswirkung auf das Bild der Fahrbahn sollen im folgenden qualitativ veranschaulicht werden (**Bild 1a bis e**):

Es zeigen im einzelnen Bild:

- a) Einfluß einer Seitenablage von der Fahrbahnmitte nach rechts,
- b) Einfluß eines Gierwinkels zwischen Fahrzeuglängs- bzw. Kameraachse und Fahrbahnrichtung nach links,
- c) Einfluß von horizontaler Fahrbahnkrümmung (Kurven)
- d) e) Einfluß von vertikaler Fahrbahnkrümmung (Steigungsänderungen)

Bild 1: Mögliche Erscheinungsbilder der Fahrbahn. Der Referenzverlauf der Fahrbahnbegrenzungen für eine zentrierte, ausgerichtete Fahrzeugposition auf ebener und gerader Straße ist jeweils mit dünner Strichstärke eingezeichnet.

1.2 Geometrisch-räumliche Modellierung — das Fahrbahnmodell

1.2.1 Allgemeines zum Fahrbahnmodell

Der räumliche Fahrbahnverlauf (bzw. der einer Skelettlinie) wird im wesentlichen durch die geometrischen Parameter der horizontalen bzw. vertikalen Fahrbahnkrümmung (c_{0h} , c_{0v}) über der Lauflänge beschrieben (vgl. **Bild 2**). Die Fahrbahnbegrenzungen werden als parallel verlaufend mit Abstand b angenommen. Die Fahrbahnwölbung und -verwindung, d. h. Änderungen des Hängewinkels, innerhalb des Vorausschaubereichs seien vernachlässigbar klein.

Bild 2 gibt einen räumlichen Fahrbahnverlauf mit horizontaler und vertikaler Krümmung wieder.

Die horizontale Krümmung c_{0h} (Krümmungsradius $R_h = 1/c_{0h}$) kann sich linear mit der Lauflänge l ändern ($dc_{0h}/dl = c_{1h} = \text{const.}$). Dies entspricht den grundlegenden Bauvorschriften und Auslegungskriterien für Straßen für höhere Fahrgeschwindigkeiten [RAS-L-1, 84]. Der Fahrbahnverlauf im Lageplan (d. h. in der Draufsicht) besteht somit aus Segmenten konstanter Krümmung, also Geraden und stationären Kurven, sowie aus Kurvenübergängen mit sich linear ändernder Krümmung (Klothoiden). Kuppen und Wannen im Höhenverlauf haben näherungsweise Kreisform (in Realität durch quadratische Parabeln approximiert).

Abgesehen von der unmittelbaren Bedeutung der horizontalen Fahrbahnkrümmung für die Seiten- und Längsführung des Fahrzeugs [Dickmanns u. Zapp, 86] läßt sich über die lokalen Krümmungsparameter der räumliche Straßenverlauf im Vorausschaubereich sehr effizient geometrisch in einem beobachterbezogenen, mitbewegten Koordinatensystem beschreiben. Darüber hinaus lassen sich die zeitlichen, über den Vorausschaubereich gemittelten Beziehungen zwischen c_{0h} , c_{1h} und \dot{c}_{0h} aufgrund des Entlangfahrens mit bekannter Eigengeschwindigkeit v als kompaktes System linearer Differentialgleichungen formulieren, wie von [Dickmanns, 88] vorgeschlagen. Dies gilt weitgehend analog auch für die Vertikalkrümmungsparameter c_{0v} , c_{1v} und \dot{c}_{0v} . D. h. es existiert ein dynamisches Modell der Fahrbahn-Krümmungsparameter, das in Verbindung mit der geometrischen Modellierung und den bekannten Abbildungsgesetzmäßigkeiten die Bestimmung dieser Größen aus der Bildfolge mittels rekursiver Schätzverfahren erlaubt (vgl. Abschnitt 1.3).

1.2.2 Das lineare Krümmungsmodell zur Beschreibung des Fahrbahnverlaufs

In der Linienführung von Straßen für mittlere und höhere Fahrgeschwindigkeiten wird u. a. die Fahrdynamik dadurch berücksichtigt, daß Krümmungsänderungen, und damit auf das Fahrzeug wirkende Querkraftänderungen, nicht sprunghaft, sondern stetig verlaufen. Dies wird durch Kurvenübergänge (Klothoiden) mit sich linear über der Lauflänge l ändernder Krümmung erreicht, d. h. es gilt

$$c(l) = c_0 + c_1 \cdot l \quad (1)$$

Hierbei ist $c = 1/R$ (Kurvenradius R) die lokale Krümmung an der Lauflängenkoordinate l und c_0 der Anfangswert der Krümmung am Ort $l = 0$.

$$c_1 = dc/dl \quad (2)$$

stellt die abschnittsweise konstante Krümmungsänderung über der Lauflänge dar, die mit dem sog. Klothoidenparameter A über $c_1 = 1/A^2$ zusammenhängt (vgl. [RAS-L-1, 84]).

Der Fahrbahnverlauf im Lageplan kann somit durch die Horizontal-Krümmungsparameter als Abfolge von Geraden, Kurvenübergangsegmenten (Klothoiden) und Kreisbögen dargestellt werden:

Gerade:	$c_0 = 0$	und $c_1 = 0$
Übergangsbogen:	$c_0 \neq 0$ oder $c_0 = 0$	und $c_1 \neq 0$
Kreisbogen:	$c_0 \neq 0$	und $c_1 = 0$

Die Fahrbahnrichtungsänderung $\Delta\chi_c$ (Bild 3) ergibt sich in Anwendung der Definition für die Krümmung $c = d\chi_c = d\chi/dl$ in der Differentialgeometrie als Integral der Krümmung über der Lauflänge mit Gl. (1) zu

$$\Delta\chi_c = \int_0^{\Delta l} c(\lambda) d\lambda = c_0 \Delta l + c_1 \frac{\Delta l^2}{2} \quad (3)$$

Die durch die Richtungsänderung über der Lauflänge auftretende laterale Ablage Δy_c von der ursprünglichen Tangente (Bild 3) wird durch einen weiteren Integrationsschritt bestimmt.

Bild 3 stellt die lokale Geometrie eines Bogensegments dar.

Für kleine Winkeländerungen $\Delta\chi \ll 1$ (mit $\sin\Delta\chi$ und $\cos\Delta\chi \approx 1$ und Gl. (3)) lassen sich in einem kartesischen Koordinatensystem folgende Näherungsbeziehungen für die Längs- und Querablage eines Punktes an der Lauflängenkoordinate Δl auf der Klothoide angeben:

$$\Delta y_c = \int_0^{\Delta l} \sin[\chi(\lambda)] d\lambda \approx \int_0^{\Delta l} \chi(\lambda) d\lambda = c_0 \frac{\Delta l^2}{2} + c_1 \frac{\Delta l^3}{6} \quad (4)$$

$$\Delta x = \int_0^{\Delta l} \cos[\chi(\lambda)] d\lambda \approx \int_0^{\Delta l} d\lambda = \Delta l \quad (5)$$

Abschätzung des Linearisierungsfehlers

Bei einer maximalen Vorausschauentfernung von $\Delta l = 20$ [m] und einer Krümmung von $c_0 = 0,01$ [1/m] (Kurv radius 100 m) ergibt sich folgender Näherungswert für die Querablage:

$$\Delta y_c = c_0 \frac{\Delta l^2}{2} = 2,0 \text{ [m]}.$$

Gegenüber dem mathematisch exakten Wert

$$\Delta y_{cex} = \frac{1}{c_0} \cdot (1 - \cos\Delta\chi) = 1,99 \text{ [m]} \text{ mit } \Delta\chi = \Delta l \cdot c_0$$

beträgt der Fehler durch die Linearisierung also ca. 0,5%.

Entsprechend [RAS-1-L, 84] werden Steigungsänderungen der Fahrbahn durch im Vertikalprofil parabolische, näherungsweise kreisförmige Übergangsegmente (Wannen u. Kuppen) realisiert. Als Parameter der Fahrbahn-Vertikalgeometrie werden hier die über die Vorausschauweite gemittelte vertikale Fahrbahnkrümmung c_{0vm} , sowie — als Hilfsgröße zur dynamischen Modellierung (speziell beim Übergang von ebenen zu vertikal gekrümmten Fahrbahnbereichen, vgl. Kap. 3.2) — die mittlere Änderung der Vertikalkrümmung über der Lauflänge $c_{1vm} = dc_{vm}/dl$ angesetzt.

Analog zu Gl. (1) bis (4) gilt dann für die Fahrbahn-Höhenänderung ΔH_{cv} aufgrund vertikaler Fahrbahnkrümmung über der Lauflänge Δl (ausgehend von horizontaler Fahrbahn):

$$\Delta H_{cv} = c_{0vm} \frac{\Delta l^2}{2} + c_{1vm} \frac{\Delta l^3}{6} \quad (6)$$

1.2.3. Die horizontale Fahrbahn- und Abbildungsgeometrie

Im Fahrbahnerfassungs-Modul gehen die räumliche Fahrbahngeometrie und die perspektivischen Abbildungsgesetzmäßigkeiten explizit in den Erkennungsprozeß mit ein.

Es zeigt:

Bild 4: Horizontale Fahrbahn- und Abbildungsgeometrie. Der Fahrzeugschwerpunkt ist mit SP gekennzeichnet, das Projektionszentrum der Kamera durch PZ.

Für die Größen in Bild 4 gilt folgende Indexkonvention:

V = Fahrzeug; K = Kamera, R = Fahrbahn, B = in Bildkoordinaten,
g = rel. zu geodätischem Koordinatensystem.

Die horizontale Bildkoordinate y_B eines Fahrbahnrand-Kantenelementes in der Vorausschauentfernung L vom Projektionszentrum (PZ) wird durch die Abbildungsparameter sowie folgende Größen der Kamera- und Fahrzeug-Relativlage bzw. der ebenen Fahrbahngeometrie bestimmt:

f — Brennweite [mm],

k_y — Kameraskalierfaktor (horizontal) [pxl/mm],

L — Vorausschauentfernung [m],

d — Abstand des Projektionszentrums vom Fahrzeugschwerpunkt [m],

ψ_{KV} — Kamera-Gierwinkel relativ zur Fahrzeuglängsachse [rad],

y_V — Ablage des Fahrzeugschwerpunkts von der Fahrbahnmitte [m],

ψ_V — Gierwinkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Fahrbahntangente [rad],

b — Fahrbahnbreite [m],

c_{ohm} — mittlere horizontale Fahrbahnkrümmung [1/m],

c_{lhm} — mittlere horizontale Fahrbahnkrümmungsänderung [1/m²].

Für alle Winkelbeziehungen der horizontalen Abbildungsgeometrie werden vereinfachend die Linearisierungen der trigonometrischen Grundfunktionen $\sin(\psi) \approx \psi$ bzw. $\cos(\psi) \approx 1$ benutzt. Für kleine Winkel $|\psi| < 10^\circ$ beträgt hierbei der maximale Fehler ca. 1,5%. Wegen des kleinen Verhältnisses von Brennweite zu Vorausschauentfernung ($f/L \ll 1$) bzw. des kleinen Abstandes zwischen Projektionszentrum und Kameradrehpunkt wird näherungsweise für die weiteren Herleitungen die Lage des Projektionszentrums, der Bildebene und des Kameradrehpunktes auf der optischen Achse als identisch angenommen.

Es ergeben sich somit in einer Vorausschauentfernung L von der Kamera-Bildebene folgende (laterale) Ablageanteile der Fahrbahnbegrenzungen von der Fahrspurmitte (vgl. Bild 4):

$$y_{Rg} = y_c \pm \frac{b}{2} \quad (6)$$

wobei $+b/2$ für den rechten und $-b/2$ für den linken Fahrbahnrand gilt, und

$$y_c = \frac{(L+d)^2}{2} c_{ohm} + \frac{(L+d)^3}{6} c_{lhm} \quad (7)$$

gemäß Gl. (1.4) im vorigen Abschnitt.

Entsprechend gilt für die Ablage der Fahrbahnbegrenzung von der Kamera-(Blickrichtungs)-Achse (vgl. Bild 4):

$$y_{RK} = y_{Rg} - (y_V + y_{\psi V} + y_{\psi KV}) \quad (8)$$

mit

$$y_{\psi V} = (L+d) \cdot \psi_V \quad (9)$$

und

$$y_{\psi KV} = L \cdot \psi_{KV} \quad (10)$$

Die Perspektivabbildung

$$y_B = \frac{f \cdot k_y}{L} \cdot y_{RK} \quad (11)$$

ergibt mit $c_{yAbb} = f \cdot k_y$ für die horizontale Bildkoordinate (skaliert in Pixel-Einheiten [pxl]) eines Kantenelementes der Fahrbahnbegrenzungen in der Vorausschauentfernung L

$$y_B = \frac{c_{yAbb}}{L} \left(\pm \frac{b}{2} - y_V - y_{\psi V} - y_{\psi KV} + y_c \right) \quad (12)$$

Die entsprechenden Elemente der Jacobischen Matrix C der Abbildungsgleichungen für das ebene und räumliche Fahrbahnmodell sind im Anhang A2 angegeben. Im ebenen Fall ist die Vorausschauentfernung L nur von der Kameraneigung gegenüber der Fahrbahn sowie von einer gewählten Bild-Vertikalkoordinate (Bildzeile) abhängig. Weist die Fahrbahn auch vertikale Krümmung auf, so geht diese in die Berechnung der Vorausschauentfernung mit ein (s. folgender Abschnitt). Da im räumlichen Fall die Vertikalkrümmungsparameter des Zu-

standsvektors des dynamischen Fahrbahnkrümmungsmodells sind, werden dann die Abbildungsgleichungen vom momentanen Vertikalkrümmungszustand abhängig, und damit nichtlinear bezüglich des Zustandsvektors.

1.2.4 Die vertikale Fahrbahn- und Abbildungsgeometrie

Die vertikale Abbildungsgeometrie wird im wesentlichen von der vertikalen Kameraposition und -Nicklage relativ zur Fahrbahn sowie von einer evtl. vorhandenen vertikalen Fahrbahnkrümmung bestimmt (vgl. Bild 5). Es wird angenommen, daß die Fahrzeug-Längsachse immer parallel zur Fahrbahn-Tangentialebene am Ort des Fahrzeug-Schwerpunkts liegt, d. h. hochfrequente Nicklagestörungen kleiner Amplitude werden vernachlässigt. Dies hat sich für stationäre Fahrzustände auf "normalen", d. h. glatt asphaltierten Straßen als realistisch erwiesen. Allerdings gilt dies nicht für unebene Straßen oder bei starken Beschleunigungs- und Abbremsmanövern, die deutliche Nickbewegungen verursachen können. Um diese Fälle bei gleichzeitiger korrekter Erkennung der Fahrbahnvertikalkrümmung bzw. Fahrbahnbreite behandeln zu können, wäre eine direkte Erfassung oder Schätzung der Fahrzeug-Nicklageänderung erforderlich.

Verdeutlicht wird in Bild 5 die vertikale Fahrbahn- und Abbildungsgeometrie.

Die benutzten Größen der vertikalen Fahrbahn- und Abbildungsgeometrie sind im folgenden zusammengefaßt:

f — Brennweite [mm],

k_z — Kameraskalierfaktor (vertikal) [pxl/mm],

d — Abstand des Projektionszentrums vom Fahrzeugschwerpunkt [m],

H_K — Höhe der Kamera über der Fahrbahntangentialebene [m],

Θ_K — Kamera-Nickwinkel relativ zur Fahrzeuglängsachse [rad],

z_B — Bild-Vertikalkoordinate in Pixel-Einheiten [pxl],

L_0 — Vorausschauentfernung bei ebener Fahrbahn [m],

L_{cv} — Vorausschauentfernung bei vertikal gekrümmter Fahrbahn [m],

H_{cv} — Höhenänderung aufgrund vertikal gekrümmter Fahrbahn [m],

c_{0vm} — mittlere Vertikalkrümmung der Fahrbahn [$1/m$],

c_{1vm} — mittlere Vertikalkrümmungsänderung der Fahrbahn [$1/m^2$].

Die zur Berechnung der Jacobischen Matrix C der Meßgleichungen (Gl. (12)) erforderliche Vorausschauentfernung $L_i = L(z_{Bi}, H_K, \Theta_K, f, k_z, c_{0vm}, c_{1vm})$ wird bzgl. einer ausgewählten Bild-Vertikalkoordinate (Bildzeile) z_{Bi} wie folgt ermittelt:

Die Neigung des Sehstrahls durch z_{Bi} gegenüber der Fahrbahntangentialebene ergibt sich zu

$$\Theta_{z_{Bi}} = \Theta_K + \arctan \frac{z_{Bi}}{f \cdot k_z} \quad (13)$$

Im Falle einer ebenen Fahrbahn berechnet sich die der Bildvertikalkoordinate z_{Bi} entsprechende Vorausschauentfernung zu

$$L_{0i} = \frac{H_K}{\tan \Theta_{z_{Bi}}} \quad (14)$$

Gemäß Gl. (6) gilt für die Fahrbahnhöhenänderung durch eine mittlere Vertikalkrümmung bzw. Krümmungsänderung über der Lauflänge $L_{cv} + d$ (d. h. relativ zur lokalen Fahrbahntangentialebene am Ort des FZG-Schwerpunktes)

$$H_{cv} = c_{0vm} \frac{(L_{cv} + d)^2}{2} + c_{1vm} \frac{(L_{cv} + d)^3}{6} \quad (15)$$

Mit Gl. (13) läßt sich die Fahrbahnhöhenänderung innerhalb der Vorausschau abhängig von z_{Bi} ausdrücken als

$$H_{cv} = H_K - L_{cv} \cdot \tan \Theta_{z_{Bi}} \quad (16)$$

Aus (16) und (15) folgt für L_{cv} ein Polynom 3. Ordnung

$$a_3 L_{cv}^3 + a_2 L_{cv}^2 + a_1 L_{cv} + a_0 = 0 \quad (17)$$

mit den Koeffizienten

$$a_3 = \frac{c_{1vm}}{6},$$

$$a_2 = \frac{1}{2} (c_{0vm} + d \cdot c_{1vm}),$$

$$a_1 = d \cdot \left(c_{0vm} + \frac{d \cdot c_{1vm}}{2} \right) + \tan \Theta_{zBi},$$

$$a_0 = \frac{d^2 \cdot c_{0vm}}{2} + \frac{d^3 \cdot c_{1vm}}{6} - H_K,$$

das über die Newton-Iteration [Heinhold u. Behringer, 76] numerisch gelöst wird. Wenn als Iterations-Startwert für L_{cv} die Lösung des jeweils vorhergehenden Abtastintervalls (oder auch der Wert für den ebenen Fall gemäß Gl. (14)) eingesetzt wird, konvergiert die Iteration typischerweise in 2–3 Schritten, d. h. der numerische Rechenaufwand ist relativ gering.

Durch Vernachlässigen des c_{1vm} -Einflusses auf die Vorausschauweite läßt sich das Polynom Gl. (17) auf 2. Ordnung vereinfachen und ist damit direkt analytisch lösbar (vgl. Gl. (19) unten). Der c_{0vm} -Schätzwert folgt einem Sprung im realen Vertikalkrümmungsverlauf wegen der Mittelung über die Vorausschauweite jedoch nur leicht verzögert ("Verschleifungseffekt"). Ein Vernachlässigen des c_{1vm} -Einflusses bewirkt beim Einfahren in vertikal gekrümmte Fahrbahnbereiche Fehler in der Vorausschauentfernung und entsprechende Differenzen in der erwarteten Breite des Fahrbahnbildes. Das seitliche Nachführverhalten der Auswertefenster auf die mit einer Vertikalkrümmungsänderung verbundene Breitenänderung des Fahrbahnbildes konnte durch explizite Berücksichtigung des c_{1vm} -Einflusses deutlich verbessert werden.

Ab einer gewissen negativen Vertikalkrümmung der Fahrbahn kann der Fall eintreten, daß das Fahrbahnbild unterhalb der gewählten Bildzeile z_{Bi} liegt, also auf der Höhe von z_{Bi} keine Kantenelemente als Merkmale extrahierbar sind. Der Krümmungswert für diesen Grenzfäll (bei dem der Sehstrahl durch z_{Bi} die Tangente an die nach unten gekrümmte Fahrbahn in der Entfernung L_{cv} bildet) läßt sich näherungsweise, unter Vernachlässigung des c_{1vm} -Einflusses, aus einem Polynom 2. Ordnung für L_{cv} abschätzen. Aus

$$H_{cv} = c_{0vm} \frac{L_{cv}^2}{2} \quad (18)$$

und Gl. (16) ergibt sich die vereinfachte, quadratische Gleichung

$$\frac{c_{0vm}}{2} L_{cv}^2 + \tan \Theta_{zBi} L_{cv} - H_K = 0 \quad (19)$$

für L_{cv} mit den Lösungen

$$L_{cv1,2} = \frac{1}{2} \left(-2 \frac{\tan \Theta_{zBi}}{c_{0vm}} (\pm) \mid \sqrt{\left(2 \frac{\tan \Theta_{zBi}}{c_{0vm}} \right)^2 + 8 \frac{H_K}{c_{0vm}}} \right). \quad (20)$$

Der Grenzfäll für die maximale negative Krümmung ("Tangentenfall") abhängig von z_{Bi} wird dadurch bestimmt, daß der Ausdruck unter der Wurzel ≥ 0 sein muß für reelle Lösung von L_{cv} , also

$$\left(\frac{2 \tan \Theta_z}{c_{0vm}} \right)^2 + 4 \frac{2 H_K}{c_{0vm}} \geq 0 \quad (21)$$

gilt. Dies ist erfüllt, solange die Vertikalkrümmung größer als der Grenzwert

$$c_{0vm} \geq -\frac{1}{2} \frac{\tan^2 \Theta_{zBi}}{H_K} + \Delta c_{0res} \quad (22)$$

ist, wobei wegen der Vernachlässigung von d und c_{1vm} noch ein "Sicherheits-Abstand" $\Delta c_{0res} = 0,0005$ gegenüber dem "Tangentenfall"-Grenzwert aus dem quadratischen Ansatz eingeführt wurde.

Falls Gl. (22) nicht mehr erfüllt ist, entfällt die Berechnung der z_{Bi} entsprechenden Vorausschauentfernung, da die Nullstelleniteration für Gl. (17) keine (hier) sinnvolle Lösung ergeben kann. Da zudem in der Bildzeile z_{Bi} ein Fahrbahn-Kantenelement nicht mehr zuverlässig extrahierbar ist, wird bei der sequentiellen Zustands-Innovation des Kalman Filters der entsprechende Meßwert ausgelassen (vgl. Abschnitt 1.4.3.1).

Als zusätzliche Beschränkung sind die Vertikalkrümmungsparameter auf die bei einspurigen Straßen im freien Gelände als maximal angenommenen Wertebereiche von $-0,003 \leq c_{0vm} \leq 0,005$ bzw. $-0,00015 \leq c_{1vm} \leq 0,00015$

begrenzt (d. h. auf Krümmungsradien zwischen 330 m negativ und 200 m positiv, bei einer maximalen vertikalen Krümmungsänderung von ebener Straße auf 300 m Radius innerhalb 20 m Vorausschau).

1.3 Dynamische Modellierung

1.3.1 Die horizontale Fahrbahnkrümmungsdynamik

In Bild 6 sind für eine S-Kurve im Fahrbahnverlauf qualitativ die horizontale Krümmung bzw. Krümmungsänderung über der Lauflänge \underline{l} (entsprechend dem linearen Krümmungsmodell, vgl. Abschnitt 1.2.2) sowie deren zeitliche Änderung aufgrund des Entlangfahrens mit einer konstanten Geschwindigkeit dargestellt. Für die Zeitableitung der Krümmung c_{0h} gilt:

$$\dot{c}_{0h} = \frac{dc_{0h}}{dt} = \frac{dc_{0h}}{d\underline{l}} \cdot \frac{d\underline{l}}{dt} = c_{1h} \cdot v. \quad (23)$$

Zur besseren Unterscheidung von der Ziffer 1 ("Eins") wird die Lauflängenkoordinate \underline{l} immer mit Unterstrich geschrieben.

Es zeigt Bild 6 den Fahrbahnverlauf und horizontale Krümmungsgrößen.

Die Unstetigkeit des c_{1h} -Verlaufs über der Lauflänge bewirkt theoretisch Dirac-Impulse in der Zeitableitung \dot{c}_{1h} , die real bzw. als Differential-Beziehungen nicht modellierbar sind. Dies läßt sich jedoch umgehen, wenn hierfür näherungsweise über den lokalen Vorausschaubereich L gemittelte Größen c_{0hm} und c_{1hm} eingeführt werden, die in ihrem "Krümmungs-Effekt" über L dem der theoretischen Größen c_{0h} und c_{1h} über \underline{l}_c äquivalent sind, d. h. die gleiche Krümmungsablage Δy_c erzeugen (vgl. Bild 7). Dieser Ansatz wurde von [Dickmanns, 88] vorgeschlagen. Es soll also gelten:

$$\Delta y_{cm}(c_{0hm}, c_{1hm}, L) = \Delta y_c(c_{0h}, c_{1h}, \underline{l}_c). \quad (24)$$

Zur Verdeutlichung

Bild 7: Die durch die gemittelten Krümmungsparameter (c_{0hm}, c_{1hm}) über die Vorausschautentfernung L bewirkte Ablage Δy_{cm} ist gleich der über die "Eindringtiefe" \underline{l}_c in den c_{1h} -Stufenbereich auftretenden Querablage Δy_c .

Die Beiträge der gemittelten Größen zur Querablage

$$\Delta y_{cm} = \Delta y_{c_{0hm}} + \Delta y_{c_{1hm}} \quad (25)$$

sind

$$\Delta y_{c_{1hm}} = c_{1hm}(\underline{l}_c) \cdot \frac{L^3}{6} \quad (26)$$

und

$$\Delta y_{c_{0hm}} = c_{0hm}(\underline{l}_c) \cdot \frac{L^2}{2} = \left[\int_0^{\underline{l}_c} c_{1hm}(\lambda) d\lambda \right] \cdot \frac{L^2}{2}. \quad (27)$$

Für $\Delta y_c(\underline{l}_c)$ gilt im Bereich $0 \leq \underline{l}_c \leq L$

$$\Delta y_c(\underline{l}_c) = c_{1h} \cdot \frac{\underline{l}_c^3}{6}. \quad (28)$$

Gleichsetzen von Gl. (25) mit Gl. (28) und Differenzieren nach \underline{l}_c ergibt für c_{1hm} folgende Differentialgleichung:

$$c_{1h} \cdot \frac{\underline{l}_c^2}{2} = \frac{dc_{1hm}}{d\underline{l}_c} \cdot \frac{L^3}{6} + c_{1hm} \cdot \frac{L^2}{2}. \quad (29)$$

Die Substitution $\frac{dc_{1hm}}{d\underline{l}_c} = c'_{1hm}$ und eine Normierung auf L mit $\xi = \frac{\underline{l}_c}{L}$ (d. h. für die normierte Eindringtiefe gilt $0 \leq \xi \leq 1$) ergibt

$$c'_{1hm}(\xi) = 3\xi^2 c_{1h} - 3c_{1hm}(\xi). \quad (30)$$

Z. B. via Laplace-Transformation ist folgende Lösung herleitbar:

$$c_{1hm}(\xi) = c_{1hm}(0)e^{-3\xi} + c_{1h} \left(\xi^2 - \frac{2}{3}\xi + \frac{2}{9}(1 - e^{-3\xi}) \right). \quad (31)$$

Am Ort des c_{1h} -Sprungs (d. h. an $\xi = 1$ bzw. $\underline{l}_c = L$) mit dem Anfangswert $c_{1hm}(0) = 0$ ergibt sich als Amplitude des gemittelten c_{1h} -Verlaufes

$$c_{1hm}(1) = c_{1h} \left(1 - \frac{2}{3} + \frac{2}{9}(1 - e^{-3}) \right) = c_{1h} \cdot 0,5445. \quad (32)$$

Ab $\xi \geq 1$ liegt der Vorausschaubereich L voll im c_{1h} -Stufenbereich. Es wird eine neue, um L gegenüber \underline{l}_c (bzw. normiert um 1 gegenüber ξ) nach rechts verschobene Laufkoordinate $\xi' = \xi - 1$ eingeführt.

Gl. (24) gilt nach wie vor, jedoch ist nun im Vorausschaubereich der Krümmungs-Anfangswert $c_{0h}(\xi') \neq 0$. Damit ergibt sich für die Querablage des Straßenrandes von der Tangente infolge der Krümmung

$$\Delta y_c(L) = c_{0h} \cdot \frac{L^2}{2} + c_{1h} \cdot \frac{L^3}{6} = c_{0hm} \cdot \frac{L^2}{2} + c_{1hm} \cdot \frac{L^3}{6} = \Delta y_{cm}(L) \quad (33)$$

bzw. nach Normieren auf L

$$c_{0h} + \frac{c_{1h}}{3} = c_{0hm} + \frac{c_{1hm}}{3}. \quad (34)$$

Gl. (34) differenziert nach ξ' ergibt, mit $dc_{0h}/d\xi' = c_{1h}$

$$c_{1h} = \frac{1}{3} \frac{dc_{1hm}}{d\xi'} + c_{1hm} \quad (35)$$

bzw. mit der Substitution $c'_{1hm} = \frac{dc_{1hm}}{d\xi'}$

$$c'_{1hm}(1) = 3c_{1h} - 3c_{1hm}(\xi') \quad (\text{für } \xi \geq 1, \text{ d. h. } \xi' \geq 0). \quad (36)$$

Obige Differentialgleichung hat die Lösung

$$c_{1hm}(\xi') = c_{1hm}(\xi' = 0) \cdot e^{-3\xi'} + c_{1h}(1 - e^{-3\xi'}). \quad (37)$$

Wegen des Anfangswertes am Ort der Stufe $c_{1hm}(\xi' = 0) = c_{1h} \cdot 0,5445$ (vgl. Gl. (32)) kann die Lösung auch als

$$c_{1hm}(\xi') = c_{1h}(1 - 0,4555 \cdot e^{-3\xi'})$$

geschrieben werden.

Statt eines Dirac-Pulses im Fall der sprungförmigen Krümmungsänderung gilt nun für die Zeitableitung der gemittelten Krümmungsänderung

$$\dot{c}_{1hm} = \frac{dc_{1hm}}{dt} = \frac{dc_{1hm}}{d\xi} \cdot \frac{d\xi}{dt} = \frac{dc_{1hm}}{d\xi} \cdot \frac{v}{L}. \quad (38)$$

Mit Gl. (30) und (38) gilt für die Zeitableitung der gemittelten Krümmungsänderung \dot{c}_{1hm} im Intervall $0 \leq \xi \leq 1$, d. h. für $0 \leq \underline{l}_c \leq L$:

$$\dot{c}_{1hm} = 3 \frac{v}{L} \left(\frac{\underline{l}_c}{L} \right)^2 \cdot c_{1h} - 3 \frac{v}{L} \cdot c_{1hm}. \quad (39)$$

Aus Gl. (36) bis (38) folgt für die Zeitableitung der gemittelten Krümmungsänderung \dot{c}_{1hm} im Intervall ab $\xi \geq 1$ bzw. $\xi' \geq 0$, d. h. nach vollständigem Eindringen der Vorausschau in den c_{1h} -Stufenbereich:

$$\dot{c}_{1hm} = 3 \frac{v}{L} \cdot c_{1h} - 3 \frac{v}{L} \cdot c_{1hm}. \quad (40)$$

Da der Ort einer Krümmungsänderung (d. h. c_{1h} -Stufe) in der Vorausschau, und damit die eventuelle "Eindringtiefe" \underline{l}_c , jedoch nicht im voraus bekannt ist und nur sehr unzuverlässig aus dem geschätzten c_{1h} -Verlauf bei

realen, verrauschten Meßwerten ermittelt werden kann, wird näherungsweise die c_{1hm} -Dynamik immer nach Gl. (40) modelliert. In der experimentellen Erprobung bzw. im Vergleich zu bekannten Referenzverläufen aus der Simulation lieferte die gemittelte Krümmungsdynamik sehr gute Schätzergebnisse (vgl. Schätzwertverläufe in Abschnitt 6).

- 5 Hiermit existieren kompakte, sehr einfache Differentialbeziehungen zwischen den für die optische Fahrbahnverfolgung und Fahrzeugquerführung gleichermaßen relevanten gemittelten Horizontalkrümmungsparametern sowie dem theoretischen (unstetigen) c_{1h} -Verlauf. Für die Zustandsschätzung wird die zeitliche Änderung von c_{1h} (theoretisch aus einer Folge von Dirac-Impulsen bestehend, deren Zeitpunkte unbekannt sind) als mittelwertfreier, weißer, gaußverteilter Rauschprozeß angesetzt. Der c_{1h} -Schätzwert wird somit im Kalman Filter aus-
- 10 schließlich über die Innovation durch die Meßwerte aus der Bildfolge "angetrieben".

Das Differentialgleichungssystem der horizontalen Fahrbahnkrümmungsdynamik lautet dann zusammengefaßt:

$$\dot{c}_{0hm} = c_{1hm} \cdot v,$$

$$15 \quad \dot{c}_{1hm} = -3 \frac{v}{L} \cdot c_{1hm} + 3 \frac{v}{L} \cdot c_{1h},$$

$$\dot{c}_{1h} = n_{c_{1h}}(t),$$

- 20 bzw. in Matrix-Vektor-Notation

$$25 \quad \dot{x}_{c_h} = A_{c_h} x_{c_h} + n_{c_{1h}} = \begin{bmatrix} 0 & v & 0 \\ 0 & -3\frac{v}{L} & 3\frac{v}{L} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{0hm} \\ c_{1hm} \\ c_{1h} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ n_{c_{1h}} \end{bmatrix} \quad (41)$$

- 30 1.3.2 Die vertikale Fahrbahnkrümmungsdynamik

Wie schon in Abschnitt 1.2.2 bzw. 1.2.4 erläutert, wird der lokale Vertikalverlauf der Fahrbahn über der Lauflänge l durch die beiden Parameter der mittleren Vertikalkrümmung c_{0vm} bzw. der mittleren Vertikalkrümmungsänderung c_{1vm} im Vorausschaubereich bis L dargestellt.

- 35 Analog zu Gl. (23) im vorigen Abschnitt gilt für die Zeitableitung der gemittelten Vertikalkrümmung

$$\dot{c}_{0hm} = \frac{dc_{0vm}}{dt} = \frac{dc_{0vm}}{dl} \cdot \frac{dl}{dt} = c_{1vm} \cdot v. \quad (42)$$

- 40 Die Zeitableitung der Krümmungsänderung \dot{c}_{1v} , die bei Einfahren in ein im Höhenprofil kreisförmiges Fahrbahnsegment (Kuppe, Wanne) wegen des Krümmungssprunges theoretisch einen Dirac-Impuls aufweist, wird ebenso wie \dot{c}_{1h} im vorigen Abschnitt als mittelwertfreier, weißer, gaußverteilter Rauschprozeß $n_{c_{1v}}$ angesetzt.

Das kontinuierliche Teilsystem der gemittelten Vertikalkrümmungsdynamik lautet somit:

$$45 \quad \dot{c}_{0vm} = c_{1vm} \cdot v$$

$$\dot{c}_{1vm} = n_{c_{1v}}(t)$$

- 50 bzw. in Matrix-Vektor-Notation

$$55 \quad \dot{x}_{c_v} = A_{c_v} x_{c_v} + n_{c_{1v}} = \begin{bmatrix} 0 & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{0vm} \\ c_{1vm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ n_{c_{1v}} \end{bmatrix} \quad (43)$$

1.3.3 Die Fahrzeug-Querodynamik

- Im 4D-Ansatz wird u. a. die Kenntnis der aktuellen Steuergrößen und deren Auswirkung auf die Eigenbewegung des Fahrzeuges (bzw. der Kamera) relativ zur Umgebung dazu genutzt, Veränderungen des Bildes im nächsten Verarbeitungszyklus vorzuberechnen, also zu "erwarten". Für die Fahrzeugspurführung durch Rechnersehen sind neben der Krümmung die laterale Fahrzeugposition und Winkellage relativ zu den Fahrbahnbegrenzungen wesentlich. Innerhalb des Fahrbahnerfassungsmoduls muß also die Seitenbewegung des Fahrzeuges modelliert sein. Eine gegenüber dem Modell von [Zapp, 88] vereinfachte Modellierung der Fahrzeugquerdynamik als System 3. Ordnung mit einem zusätzlichen Integrator als Lenkstellglied erwies sich für die optische Fahrbahn- und Relativlageerfassung als völlig ausreichend.

Bild 8 zeigt das Ersatzmodell der Fahrzeugseitenbewegung. Modellparameter der Fahrzeugquerdynamik sind

a_{Achse} — Achsabstand (3,5 m),
 k_r — Reifen-Seitenkraftbeiwert (150 kN/rad),
 m — Fahrzeugmasse (4000 kg),
 V — Fahrgeschwindigkeit.

In Klammern sind jeweils die Werte für das Versuchsfahrzeug "VaMoRs" L508D angegeben.
 Die Zustandsgrößen der Seitenbewegung sind

λ — Lenkwinkel [rad],
 β — Schwimmwinkel [rad],
 y_v — Seitenablage von der Fahrbahnmitte [m],
 ψ_v — Gierwinkel relativ zur Fahrbahntangente [rad].

Als abgeleitete Größe, die nicht explizit im Modell auftritt, sei noch der Bahnwinkel χ_v relativ zur Fahrbahntangente aufgeführt.

Das benutzte Fahrzeugquerdynamikmodell (vgl. Bild 8) entspricht in seiner Struktur weitgehend dem linearen ebenen Einspurmodell nach [Mitschke, 72; Donges, 78], das von [Zapp, 88] für den Fahrzeug-Querreglerentwurf benutzt wurde, jedoch mit folgenden zusätzlichen Vereinfachungen:

1. Der Fahrzeug-Schwerpunkt wird (symmetrisch) in der Mitte zwischen Vorder- und Hinterachse angenommen. Dadurch entfällt eine Unterscheidung zwischen der Hebelarmlänge vor und hinter dem Schwerpunkt. Es bleibt nur mehr ein Geometrieparameter a_{Achse} .
2. Die auf die Reifen wirkenden Umfangskräfte werden vernachlässigt. Die Seitenkraftbeiwerte für die Vorder- und Hinterreifen werden gleich groß angesetzt und für beide Reifen einer Achse im Parameter k_r zusammengefaßt.
3. Der Einfluß des Lenkwinkelschlags λ auf die Gierrate $\dot{\psi}_v$ des Fahrzeugs ist gegenüber dem Modell nach Donges auf eine kinematische Beziehung vereinfacht. Unter der Annahme einer symmetrischen Schwerpunktlage entfällt zum einen der Einfluß des Schwimmwinkels β auf die Gierwinkelgeschwindigkeit. Zusätzlich wird eine kleine geschwindigkeitsabhängige Zeitkonstante von 0,1 bis 0,2 s (bei den in [Zapp, 88] benutzten Fahrzeugparameterwerten) zwischen λ und $\dot{\psi}_v$ vernachlässigt, die in der ursprünglichen Differentialgleichung modelliert ist.

Bezüglich des Ansatzes der ursprünglichen Seitenbewegungsgleichungen aus dem Querkräftegleichgewicht bzw. Momentengleichgewicht um die Fahrzeughochachse wird auf [Donges, 78] und [Zapp, 88] verwiesen. Im folgenden werden die Bewegungsgleichungen für das vereinfachte, ebene Einspurmodell 3. Ordnung mit einem Integrator als Stellglied angegeben.

Die Lenkantriebsdynamik lautet also

$$\dot{\lambda}(t) = k_\lambda \cdot u_\lambda(t). \quad (44)$$

Mit den oben aufgeführten Vereinfachungen des Modells nach Donges lautet die Differentialgleichung für den Schwimmwinkel

$$\dot{\beta}(t) = \left(-2 \frac{k_r}{mv(t)} \right) \beta(t) + \frac{v(t)}{a_{\text{Achse}}} - \frac{k_r}{mv(t)} \lambda(t). \quad (45)$$

Für die Gierwinkelrate abhängig von Lenkwinkel und Fahrgeschwindigkeit kann eine kinematische Näherung angewandt werden: Die Querablage der Vorderachse durch ein mit Lenkeinschlag λ gefahrenes Weginkrement d_1 ergibt sich für kleine λ (vgl. Bild 9) zu

$$dy = d_1 \cdot \sin \lambda \approx d_1 \cdot \lambda \quad (46)$$

Näherungsweise kann diese Querablage auch über

$$dy = a_{\text{Achse}} \cdot d\psi_v \quad (47)$$

ausgedrückt werden.

Bild 9 veranschaulicht die Lenkinematik.

Durch Gleichsetzen von Gl. (46) mit (47) und Differenzieren nach der Zeit folgt

$$\frac{d\psi_v}{dt} = \frac{\lambda}{a_{\text{Achse}}} \cdot \frac{d_1}{dt}$$

bzw.

$$\dot{\psi}_{Vg} = \frac{\lambda}{a_{Achse}} \cdot v \quad (48)$$

- 5 für die inertielle Gierrate des Fahrzeugs aufgrund eines Lenkeinschlags λ bei der Fahrgeschwindigkeit v . Die (zeitliche) Richtungsänderung der Fahrbahntangente aufgrund des Einfahrens in eine Kurve mit der Krümmung $c_{0h} = d\chi_R/dl$ ergibt sich zu

$$10 \quad \frac{d\chi_R}{dt} = c_{0h} \cdot \frac{dl}{dt}$$

bzw.

$$15 \quad \dot{\chi}_R = c_{0h} \cdot v. \quad (49)$$

Für die relative Gierbewegung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn folgt dann aus der Differenz von Gl. (48) und Gl. (49)

$$20 \quad \dot{\psi}_v = \dot{\psi}_{Vg} - \dot{\chi}_R = \frac{\lambda}{a_{Achse}} \cdot v - c_{0h} \cdot v. \quad (50)$$

- 25 Der Bahnwinkel χ_v des Fahrzeugs relativ zur lokalen Fahrbahntangente am Ort des Fahrzeug-Schwerpunktes (vgl. Bild 6) ergibt sich zu

$$\chi_v = \psi_v + \beta, \quad (51)$$

so daß für die Bewegungskomponente quer zur Fahrbahnrichtung

$$30 \quad y_v = v \cdot \sin \chi_v \approx v \cdot \chi_v \quad (52)$$

gilt.

- 35 Das kontinuierliche, lineare und geschwindigkeitsabhängige Zustandsmodell 4. Ordnung der Fahrzeugquerdynamik lautet somit zusammengefaßt

$$\dot{\lambda}(t) = k_\lambda \cdot u_\lambda(t),$$

$$40 \quad \dot{\beta}(t) = \left(-2 \frac{k_r}{mv(t)} \right) \beta(t) + \left(\frac{v(t)}{a_{Achse}} - \frac{k_r}{mv(t)} \right) \lambda(t),$$

$$\dot{y}_v(t) = v(t) \left(\dot{\psi}_v(t) + \dot{\beta}(t) \right),$$

$$45 \quad \dot{\psi}_v(t) = \frac{v(t)}{a_{Achse}} \lambda(t) - v(t) c_{0h}(t),$$

bzw. in Matrix-Vektor-Notation

$$50 \quad \dot{\chi}_v = A_v \chi_v + b_v u_\lambda + b_c c_{0h}$$

Hierbei bedeuten

$$55 \quad A_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_F & a_F & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & v \\ c_F & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad x_v = \begin{bmatrix} \lambda \\ \beta \\ y_v \\ \psi_v \end{bmatrix} \quad b_v = \begin{bmatrix} k_\lambda \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -v \end{bmatrix} \quad (53)$$

mit den Elementen

$$65 \quad c_F = \frac{v}{a_{Achse}}, a_F = 2 \left(-\frac{k_r}{m \cdot v} \right) \text{ und } b_F = \frac{k_r}{m \cdot v} + c_F.$$

1.3.4 Das kontinuierliche Gesamtsystem

Die Systemmatrix des vollständigen, kontinuierlichen dynamischen Modells des Fahrbahnerfassungsmoduls setzt sich aus den Teilsystemen der Fahrzeugquerdynamik A_v , der Horizontalkrümmungsdynamik A_{ch} , sowie der Vertikalkrümmungsdynamik A_{cv} zusammen. Als Alternative zur dynamischen Modellierung der vertikalen Fahrbahnkrümmung wurde auch die Schätzung der Fahrbahnbreite als stationärer (aber verrauschter, 'unsicherer') Parameter realisiert. Hierfür müssen die letzten beiden Spalten bzw. die untersten Zeilen der Gesamtsystemmatrix (Gl. (54)) durch eine Nullspalte bzw. Nullzeile ersetzt werden.

In Matrix-Vektor-Notation lautet das Gesamtsystem somit:

$$\dot{x} = Ax + bu_\lambda + n$$

bzw. ausgeschrieben

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \beta \\ y_v \\ \psi_v \\ c_{0hm} \\ c_{1hm} \\ c_{1h} \\ c_{0vm} \\ c_{1vm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_F & a_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_F & 0 & 0 & 0 & -v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3\frac{v}{L} & 3\frac{v}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \beta \\ y_v \\ \psi_v \\ c_{0hm} \\ c_{1hm} \\ c_{1h} \\ c_{0vm} \\ c_{1vm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_\lambda + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ n_{c_{1h}} \\ 0 \\ n_{c_{1v}} \end{bmatrix} \quad (54)$$

wobei a_F , b_F und c_F im vorigen Abschnitt angegeben sind. Die Elemente der A und b entsprechenden zeitdiskreten Transitionsmatrix Φ bzw. des diskreten Eingangsverstärkungsvektors g sind im Anhang A3 angegeben.

1.4 Rekursive Zustandsschätzung als Interpretationsmechanismus

1.4.1 Zentrale Funktionen der Zustandsschätzung

Die Zustandsschätzung erfolgt im 4D-Ansatz zur Bildfolgenauswertung über ein instationäres Kalman Filter. Es erfüllt zwei zentrale Funktionen im visuellen Interpretationsprozeß:

a) Es stellt im Sinne einer abstrahierenden und datenreduzierenden Verarbeitungskomponente eine direkte Transformation von Merkmalskoordinaten in der Bildebene in problembezogene, d. h. hier regelungsorientierte, physikalische Größen (z. B. Fahrzeugrelativposition und Fahrbahnverlauf) in Raum und Zeit dar. Diese Transformation beinhaltet wiederum zwei wesentliche Komponenten:

- die Inversion der perspektivischen Abbildung durch die Anpassung der Bewegungsmodelle im Sinne kleinster Fehlerquadrate der Vorhersagefehler.
- die Glättung verrauschter Prozeß- und Meßdaten.

Beide Aspekte werden in einem einzigen Schritt und damit sehr effizient abgearbeitet.

b) Gleichzeitig bildet die Zustandsschätzung im Sinne einer in der Verarbeitungshierarchie nach unten gerichteten Verarbeitungskomponente die Kontroll- und Steuerungsinstanz für die lokale, verteilte Merkmalsextraktion.

Das Grundprinzip der rekursiven Zustandsschätzung zur robusten Bildfolgeninterpretation soll im folgenden kurz skizziert werden (eine ausführliche Darstellung der angewandten Verfahren erfolgt in den anschließenden Abschnitten):

Mittels der bekannten, modellierten Fahrzeug- und Fahrbahnparameter-Dynamik (letztere infolge der Eigengeschwindigkeit v des Fahrzeugs auf der Fahrbahn, beide zusammengefaßt in Form der Transitionsmatrix $\Phi(v)$, Gln. (54) bzw. (55) unten) kann ausgehend von einem Schätzwert für den aktuellen Systemzustand (\hat{x}) der zukünftige Systemzustand (\hat{x}) zum nächsten Verarbeitungszyklus vorausberechnet werden. Die auf das Fahrzeug wirkenden Stellgrößen (u) und die Fahrgeschwindigkeit (v) gehen in die zeitliche Zustands-Extrapolation explizit mit ein, zufällige auf das System wirkende Störungen jedoch nicht. Über die nichtlinearen Abbildungsgesetzmäßigkeiten (Gln. (12) bzw. (56) unten) ist damit auch das 'erwartete' Bild der Fahrbahn berechenbar, in Form eines Vektors neuer Merkmalskoordinaten \hat{y} in der (2D)-Bildebene. Diese Information kann direkt zur Steuerung der Merkmalsextraktion verwendet werden, nämlich wo im Bild (= Fensterposition) und in welchem Sektor von Vorzugsorientierungen (= Operator-Richtungsauswahl) Kantenkandidaten zu extrahieren sind.

Die Vorhersagefehler ($y - \hat{y}$), d. h. die Abweichungen zwischen erwarteten und tatsächlichen Merkmalpositionen im Bild, führen über eine Gewichtungsmatrix K zu einer Korrektur des erwarteten Zustands \hat{x} (Gl. (58)). Dieser als Innovation bezeichnete Schritt bringt durch die Meßwerte neue Information über den beobachteten Prozeß in die Schätzung ein. Die räumlich-zeitliche Modellvorstellung in Form des Zustandsvektors \hat{x} wird somit

den 2D-Szenenveränderungen im Bild nachgeführt.

Aus einem redundanten und mehrdeutigen Satz von Kantenelementen werden nur die selektiert und gehen in die Zustands-Innovation ein, die den erwarteten Koordinaten \hat{y} am nächsten liegen (Gl. (57)). Der Selektions-schritt wird durch die in der Schätzfehler-Kovarianzmatrix P enthaltene Information unterstützt, die der 'Unsicherheit' der aktuellen Schätzwerte entspricht: Die Abbildung der um einen Zeitschritt extrapolierten Schätzfehlerkovarianz in den Meßwertraum liefert die sogenannte 'innovations variance' [Bierman, 77]. Diese stellt ein Maß für den zulässigen Toleranzbereich dar, in dem neu extrahierte Kantenelemente um die erwarteten Koordinaten \hat{y} streuen dürfen.

Bei sequentieller, skalarer Verarbeitung des Meßwertvektors können so 'Ausreißer' eliminiert werden. D. h. mit der Modellvorstellung inkonsistente Kantenkandidaten werden schon vor der Innovation aussortiert. Die Selektionsfähigkeit trägt dadurch wesentlich zur Schätzqualität, ganz besonders aber zur Robustheit des Ansatzes gegenüber Störungen bei. Auch stellt die Anzahl der verworfenen Merkmale unmittelbar ein Bewertungskriterium für die aktuelle Übereinstimmung von Modell und Realität dar.

Die Abbildungsgleichungen (Gl. (56)) werden hierbei nur vorwärts ausgewertet, d. h. vom Zustandsraum (als 'Interpretations-Welt') in den Meßraum (Bildebene) abbildend und damit in der gleichen Richtung wie der parallel dazu stattfindende 'echte', physikalische Abbildungsvorgang über den Sensor. Die nicht-eindeutige inverse Perspektivtransformation von der Bildebene zurück in räumliche Koordinaten wird umgangen. Sie erfolgt implizit bei der Nachführung der Modellvorstellung auf die Szenenveränderungen durch Minimierung der Summe der Quadrate der Vorhersagefehler.

Der Kalman Filter Algorithmus wurde in einer optimierten, numerisch effizienten und stabilen Form nach [Bierman, 77] implementiert. Hierbei ist die Schätzfehler-Kovarianzmatrix faktorisiert in $P = U \cdot D \cdot U^T$, wobei U eine obere Einheits-Dreiecksmatrix und D eine Diagonalmatrix darstellt. Die Anwendbarkeit und hohe Effizienz dieses Ansatzes für die visuelle Bewegungserfassung und -Steuerung in der Robotik wurde erstmals von [Wünsche, 86] demonstriert. Der vollständige Selektions-, Innovations- und Prädiktionszyklus für die Kovarianz und den Zustand des dynamischen Modells im Fahrbahnerfassungs-Modul, bei Verarbeitung von acht Kantenelementen der Fahrbahnbegrenzungen, wird z. B. in etwa 40 ms Rechenzeit auf einem Objektprozessor (20 MHz 80 386/87) des Multiprozessorsystems ausgeführt.

Die grundlegenden Schritte des Zustands-Schätzzyklus bei der Bildfolgenauswertung im '4D-Ansatz' sind:

$$\dot{\hat{x}}_k = \Phi_{k-1}(v) \cdot \hat{x}_{k-1} + b_{k-1}(v) \cdot u_{k-1} \text{ (Prädiktion)} \quad (55)$$

$$\dot{\hat{y}}_k = g(\dot{\hat{x}}_k, p) \text{ (nichtlineare Perspektivabbildung vorwärts, } p \text{ enthält Abbildungsparameter)} \quad (56)$$

$$y_k = \{y_{ki} \mid |y_{ki} - \dot{\hat{y}}_{ki}| < \alpha(P)\} \text{ (Selektion)} \quad (57)$$

$$\hat{x}_k = \dot{\hat{x}}_k - \dot{\hat{y}}_k \text{ (Innovation)} \quad (58)$$

wobei $\dot{\hat{x}}$ der Vektor der extrapolierten Zustände und \hat{x} die vom Filter geschätzten Zustände sind; y beinhaltet die Positionen der für die Innovation selektierten Merkmale (Kantenelemente). Die Berechnung der Filterverstärkungsmatrix K sowie der Schätzfehler-Kovarianzen P im UD-faktorisierten Verfahren nach Bierman wird in Abschnitt 1.4.3 eingehender erläutert.

Zusammengefaßt bietet der räumlich-zeitlich modellgestützte, rekursive Ansatz zur Bildfolgenauswertung folgende Vorteile:

- 1) Nur das jeweils letzte Bild der Bildfolge geht in die Verarbeitung ein. Ein Abspeichern von Bildsequenzen, und eine entsprechend zeitlich verzögerte Rückwärtsauswertung, entfällt.
- 2) Die Prädiktionsfähigkeit über das dynamische Modell erlaubt 'Erwartungen' der Szenenveränderungen zur Kontrolle und Steuerung der Merkmalsextraktion stützend miteinzubeziehen. Dies trägt besonders bei hohen Störanteilen oder lokalen Mehrdeutigkeiten im Bild wesentlich zur Robustheit des Ansatzes bei.
- 3) Die Anzahl der Meßwerte (verwertete Merkmale) pro Verarbeitungszyklus darf variieren, zeitweise kann sogar totales Ausbleiben von neuer Meßinformation über die dynamischen Modelle kompensiert werden. Dies ist in der Bildfolgenauswertung ebenfalls nutzbar bei schlechter Szenenqualität bzw. sich ändernden Sichtbarkeitsverhältnissen, z. B. bei Verdeckungen.
- 4) Meßunsicherheiten und Systemstörungen können im Kalman Filter explizit berücksichtigt werden. Darüber hinaus lassen sich daraus auch Bewertungsmaße für die aktuelle Schätzqualität bestimmen.
- 5) Der Zustandsvektor stellt eine extrem kompakte Datenstruktur zur Beschreibung des momentanen Systemzustandes dar. Er eignet sich dadurch sehr gut zu effizientem Informationsaustausch zwischen Teilmodulen bzw. zu höheren Ebenen der Bildauswertung.
- 6) Das Verfahren ist in Kombination mit parallelen, lokalen Merkmalsextraktionsverfahren rechentechnisch sehr effizient. Verarbeitungsraten von 10 bis 25 Hz sind für Modelle achter bis zehnter Ordnung mit der derzeitigen Rechenleistung eines einzigen 32-bit Standard-Mikroprozessors ohne weiteres erreichbar.

1.4.2 Allgemeines zum Kalman Filter

Das Kalman Filter nach [Kalman, 60] ist ein zeitdiskreter, optimaler Schätzer für den Zustand eines dynamischen Systems, auf das Steuerungen und stochastische Störungen einwirken. Es stellt einen rekursiven, linearen Schätzalgorithmus nach der Minimierung der Summe der gewichteten Fehlerquadrate dar, um den unbekannten Zustand eines dynamischen Systems aus verrauschten, zeitdiskreten Meßwerten bestmöglich zu bestimmen. Die

statistischen Kenngrößen der Störgrößen und Meßfehler werden dafür als bekannt vorausgesetzt. Die Struktur des Kalman Filters findet sich auch im Luenberger-Beobachter wieder [Brammer u. Siffling, 75]. Der Unterschied besteht darin, daß die Rückführungsgewichtungen der Vorhersagefehler bei letzterem nicht nach stochastischen, sondern nach rein deterministischen Kriterien (vorgegebene Beobachterdynamik) abgeleitet werden.

Gegeben sei ein zeitdiskretes dynamisches System

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + b_k u_k + w_k \quad (59)$$

auf das die Prozeßstörungen w_k einwirken und von dem die mit Meßfehlern v_k behafteten Messungen

$$y_k = C_k x_k + v_k \text{ (für lineare Meßgleichungen)} \quad (60)$$

bzw.

$$y_k = g(x_k, p) + v_k \text{ (für nichtlineare Meßgleichungen)} \quad (61)$$

zur Verfügung stehen. Die Störungen v_k und w_k werden als gaußverteilt, zeitlich unkorreliert (weiß) und mittelwertfrei angenommen, d. h. mit Erwartungswerten $E\{w\}=0$ und $E\{v\}=0$, und den Kovarianzmatrizen $R = E\{ww^T\}$ und $Q = E\{vv^T\}$. Die Systemstörungen und Meßfehler sind zudem untereinander nicht korreliert.

Für den Schätzfehler $\tilde{x} = \hat{x} - x$, wobei x den nicht zugänglichen 'wahren' Systemzustand und \hat{x} den Schätzwert darstellt, gelte $E\{\tilde{x}\}=0$ bzw. für dessen Kovarianzmatrix $P = E\{\tilde{x}\tilde{x}^T\}$.

Die konventionelle Kalman Filter Rekursion zur Berechnung der Schätzfehlerkovarianzen P bzw. der Filterverstärkungsmatrix K (für den k -ten Zeitschritt ausgehend von bekannten Anfangskovarianzen \hat{P}_0) lautet:

$$\hat{P}_k = \Phi_{k-1} \hat{P}_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \text{ (Prädiktion)} \quad (62)$$

$$K_k = \hat{P}_k C_k^T (C_k \hat{P}_k C_k^T + R_k)^{-1} \quad (63)$$

$$\hat{P}_k = \hat{P}_k - K_k C_k \hat{P}_k \text{ (Innovation)} \quad (64)$$

Hierbei ist C_k im Fall nichtlinearer Meßgleichungen die Jacobische Matrix der Meßgleichungen zum Zeitpunkt k , d. h. die Matrix der partiellen Ableitungen der m -vektorierten Funktion $g(x_k, p)$ nach den n Elementen des Zustandsvektors x_k (vgl. auch Anhang A2).

$$C_k = \frac{\partial g(x_k, p)}{\partial x_k} \quad (65)$$

Die wesentlichen Nachteile einer Implementierung des Algorithmus in obiger Form bezüglich Rechenaufwand und numerischer Eigenschaften sind:

- Gl. (63) erfordert die explizite Inversion einer $n \times n$ Matrix.
- In Gl. (64) sind potentielle Größenordnungsunterschiede der Operanden im Hinblick auf numerische Stabilität und Rechengenauigkeit kritisch.

1.4.3 Varianten des Kalman Filter

Im Rahmen der Raumfahrtprojekte der NASA Mitte der 60er Jahre wurden intensive Weiterentwicklungen der rekursiven Filterverfahren durchgeführt. Diese Arbeiten wurden zum einen wesentlich durch die Implementationsbeschränkungen der damaligen Bordcomputer bezüglich Wortlänge, Rechenleistung und Arbeitsspeichergröße motiviert, aber auch generell durch numerische Probleme, die in der konventionellen Formulierung des Kalman-Filter-Algorithmus auftreten können [Bierman, 77; Maybeck, 79].

1.4.3.1 Sequentielle Filter

Der zeitaufwendige Schritt einer expliziten Matrixinversion bei der Berechnung der Schätzfehlerkovarianzen läßt sich vermeiden, wenn $R_k = \text{Diag}(r_i)$ eine Diagonalmatrix ist. Dies ist gegeben, wenn die Meßfehler untereinander nicht korreliert, also unabhängig sind (ein diagonales R ist auch für korrelierte Meßfehler durch eine entsprechende Transformation der Meßgleichungen zu erreichen, vgl. [Chui u. Chen, 87]). Hierbei können die Meßwerte y_i bzw. deren Fehlervarianzen r_i einzeln (in skalarer Form), nacheinander eingebracht werden. Dadurch ergibt sich ein sequentieller Algorithmus anstelle von Gl. (63) und (64), der pro Zeitschritt k für den Meßwertindex $i=1, m_k$ durchlaufen wird (Gln. (56) bis (69)). Die Meßmatrix C wird entsprechend nur zeilenweise verarbeitet. Die konventionelle sequentielle Innovation für Schätzwert und Kovarianz für den i -ten Meßwert (mit $x_{i0} = \hat{x}_k$ und $P_{i0} = \hat{P}_k$) lautet (zum k -ten Zeitschritt, wobei zur besseren Übersichtlichkeit der Zeitindex k hier weggelassen wurde):

$$P_i = P_{i-1} - \left(P_{i-1} c_i^T \right) \cdot \frac{1}{\alpha_i} \cdot \left(c_i P_{i-1} \right) \quad (66)$$

mit

$$\alpha_i = c_i P_{i-1} c_i^T + r_i \quad (67)$$

Die Jacobische Matrix C kann hierbei innerhalb eines Zeitschritts konstant bleiben. Für den Vektor der Filterverstärkungen ergibt sich somit

$$k_i = P_i c_i^T \frac{1}{\alpha_i} \quad (68)$$

Die Korrektur des aktuellen Zustandsschätzwerts durch Einbringen des i-ten Meßwerts lautet

$$x_i = x_{i-1} + k_i [y_i - \hat{y}_i] \quad (69)$$

wobei

$$\hat{y}_i = g_i(x_{i0}, p) = g_i(\hat{x}_k, p) \quad (70)$$

Die Matrixinversion aus Gl. (63) ist somit auf eine Rekursion mit skalarer Division zurückgeführt worden. Die sequentielle Verarbeitung skalarer Meßwerte anstatt blockweiser Verarbeitung ganzer Meßwertvektoren konstanter Länge ermöglicht es zudem, eine jeweils pro Zeitschritt variierende Anzahl m_k von Meßwerten zu berücksichtigen. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die Anwendung dieser Schätzverfahren zur Bildfolgenauswertung. Dabei kann sich die Anzahl der aktuell sichtbaren bzw. extrahierbaren Merkmale abhängig von den Aspektbedingungen (vgl. [Wünsche, 88]) oder bedingt durch Szeneninhalte und -Qualität (speziell im Fall natürlicher Szenen) signifikant ändern.

1.4.3.2 Square-Root Filter

Eine weitere rechentechnisch vorteilhafte Modifikation des konventionellen Kalman Filters bilden die sogenannten 'Square-Root Filter', wobei Dreieckszerlegungen der Kovarianzmatrix P in der Form

$$P = S \cdot S^T$$

benutzt werden, S also einer 'Quadratwurzel' von P entspricht. Diese Varianten wurden ursprünglich angegeben von [Potter, 64; Andrews, 68]. Abgesehen davon, daß S nur mehr $\frac{n(n+1)}{2}$ anstatt n^2 Elemente enthält und Dreiecksmatrizen einfacher zu invertieren sind (sofern überhaupt nötig), ist damit automatisch die definitionsge-
mäße, aber im konventionellen Fall durch numerische Effekte 'verlierbare' Symmetrie von P garantiert. Darüber hinaus weisen diese Filter wesentlich bessere numerische Eigenschaften auf, da nur mehr die Quadratwurzeln von potentiell sehr großen bzw. sehr kleinen Elementen vorkommen und damit die Größenordnungsunterschiede (Exponenten) von Operanden halbiert werden.

1.4.4 Das UD-faktorierte Kalman Filter

Eine Sonderform der Square-Root Filter bildet das UD-faktorierte Kalman Filter nach [Bierman, 75]. Hierbei ist die $n \times n$ Schätzfehlerkovarianzmatrix P faktorisiert in

$$P = U \cdot D \cdot U^T \quad (71)$$

wobei D eine Diagonalmatrix und U eine obere Einheits-Dreiecksmatrix (d. h. mit Einsen auf der Diagonale) darstellt. Die ursprüngliche, 'ausmultiplizierte' Form der $n \times n$ Kovarianzmatrix P tritt im Algorithmus nicht mehr explizit auf.

Zu den numerisch günstigen Eigenschaften dieser Faktorisierung in Kombination mit der sequentiellen Formulierung des Kalman Filter kommen noch sehr effiziente Implementationsmöglichkeiten, die speziell für Echtzeitanwendungen optimierte Algorithmen ergeben. So werden z. B. Dreiecksmatrizen spaltenweise dicht in eindimensionalen Feldern abgelegt. Durch Indextabellen läßt sich der Adreßberechnungsaufwand gegenüber 2-dimensionalen Feldern wesentlich reduzieren. Auch kann die Besetzungsstruktur der Transitionsmatrizen ggf. vorteilhaft genutzt werden. Die Rechengenauigkeit und numerische Stabilität übertrifft selbst bei ausschließlicher Benutzung von Gleitkommaoperanden einfacher Genauigkeit (32-bit) die des konventionellen, nicht-faktorierten Kalman Filters bei Verwendung von Variablen doppelter Genauigkeit (64-bit).

1.4.4.1 Sequentielle Kovarianz-Innovation im UD-Algorithmus

Der Rechengang für die sequentielle, skalare Kovarianz-Innovation (engl. 'measurement update') in der UD-faktorierten Form entspricht grundsätzlich Gl. (66) bis (68) unter Anwendung der Substitution $P = U \cdot D \cdot U^T$. Er ist detailliert bei [Bierman, 77] oder [Maybeck, 79, pp. 392 ff.] angegeben. Ein zentraler Schritt ist dabei jeweils die Faktorisierung einer symmetrischen, positiv semidefiniten Matrix über eine Variante der sogenannten

Cholesky-Zerlegung.

Der skalare Term α_i aus Gl. (67) wird von [Bierman, 77] als 'innovations variance' bezeichnet. Er gibt die in den Meßwertraum (hier Merkmalskoordinaten in der Bildebene) abgebildete Varianz des extrapolierten Schätzstands (für den k-ten Zeitschritt vor Berücksichtigung des i-ten Meßwertes) an, addiert zur Varianz r_i des i-ten Meßwertes. Die 'innovations variance' entspricht somit einer Varianz des Vorhersagefehlers zwischen dem

neuem Meßwert y_i und dem erwarteten Wert $\hat{y}_i = g_i(\hat{x}, p)$ aus der Prädiktion. Unter der Annahme gaußverteilter Störungen mit Varianz $\sigma^2_{y_i} = \alpha_i$ liegen 99% aller Meßwerte in einem Band von $\pm 3\sigma_{y_i}$ um den erwarteten Wert \hat{y}_i . Die Innovations-Varianz α_i kann somit, wie von [Wünsche, 86; 88] realisiert, zur Meßwert-Konsistenzüberprüfung bzw. als Selektionskriterium zur Aussonderung von 'Meßwert-

$$|y_i - \hat{y}_i| < 3\sigma_{y_i} \text{ bzw. } (y_i - \hat{y}_i)^2 < 9\alpha_i \quad (72)$$

ausreißern' angewendet werden. D. h. Meßwerte, die die Bedingung nicht erfüllen, gehen demnach nicht in die Zustands- und Kovarianzinnovation ein. Dies trägt wesentlich zur Robustheit gegenüber Störungen bzw. Mehrdeutigkeiten bei, die sich besonders in natürlichen Szenen durch die lokale Merkmalsextraktion ergeben können (vgl. auch Abschnitt 4 zur Merkmalsextraktion bzw. Abschnitt 6). Die im Fahrbahnerfassungsmodul benutzten Werte der Meßwertvarianzen r_i , die u. a. in die 'Innovations-Varianzen' α_i und damit in die Bestimmung der Selektionskriterien eingehen, sind im Anhang A4 angegeben.

1.4.4.2 Kovarianz-Prädiktion im UD-Algorithmus

Die zeitliche Extrapolation der Schätzfehlerkovarianzen nach Gl. (73) bewirkt immer eine Zunahme der Schätz-'Unsicherheit', da unter Störungseinfluß einen Zeitschritt vorausgerechnet wird (vgl. additiver Beitrag von Q), ohne daß (zunächst) neue Information über den Systemzustand mit eingeht. Der Kovarianz-Prädiktions-schritt nimmt bei Filtern mit relativ wenigen Meßwerten (d. h. deren Anzahl entspricht etwa der Systemordnung) einen signifikanten Anteil des Rechenaufwands pro Zeitschritt ein.

Deswegen sind speziell bei den Algorithmus-Varianten für Echtzeitanwendungen lauffeiztoptimierende Implementationsaspekte sehr stark berücksichtigt worden.

Die konventionelle Kovarianz-Prädiktion lautet

$$\hat{P}_{k+1} = \Phi_k \hat{P}_k \Phi_k^T + Q_k \quad (73)$$

Mit der Substitution $\hat{P} = \hat{U} \hat{D} \hat{U}^T$ bzw. $\hat{P} = \hat{U} \hat{D} \hat{U}^T$ ergibt Gl. (73)

$$\hat{U}_{k+1} \hat{D}_{k+1} \hat{U}_{k+1}^T = \Phi_k \hat{U}_k \hat{D}_k \hat{U}_k^T \Phi_k^T + Q_k, \quad (74)$$

bzw. mit $\hat{W} = \Phi \hat{U}$ als Zwischenprodukt gilt

$$\hat{U}_{k+1} \hat{D}_{k+1} \hat{U}_{k+1}^T = \hat{W}_k \hat{D}_k \hat{W}_k^T + Q_k. \quad (75)$$

In der UD-faktorierten Formulierung des Kalman-Filter Algorithmus nach Bierman und Thornton gliedert sich der Kovarianz-Prädiktions-schritt (engl. auch 'time update' oder 'time propagation') grundsätzlich in zwei aufeinanderfolgende Unterschritte:

- a) Die Matrixmultiplikation zur Berechnung des Zwischenproduktes $\hat{W} = \Phi \hat{U}$. Die Berechnung von \hat{W} erfolgt bei allgemeinen, voll besetzten Transitionsmatrizen als konventionelle $n \times n$ Matrixmultiplikation. Im nicht seltenen Fall einer dünn besetzten Transitionsmatrix Φ kann die Matrixmultiplikation jedoch durch einen speziellen Algorithmus nach [Thornton u. Bierman, 80] ausgeführt werden, der nur die nichtverschwindenden Elemente von Φ benutzt und entsprechend schneller ist.
- b) Die neuerliche Orthogonalzerlegung von \hat{W} , \hat{D} und Q in \hat{U} und \hat{D} , die Faktoren der um einen Zeitschritt extrapolierten Kovarianzmatrix \hat{P} , erfolgt über den sogenannten 'modifizierten Gram-Schmidt' Algorithmus [Lawson u. Hanson, 74; Stewart, 79; Maybeck, 79].

Die 'modifizierte Gram-Schmidt-Orthogonalisierung' ist Kern der Zerlegung von \hat{W} und \hat{D} und soll hier kurz skizziert werden, da im folgenden Abschnitt eine lauffeiztreduzierende Implementationsvariante diskutiert wird. Für die gewichteten Skalarprodukte zweier Vektoren wird die Notation

$$[v, w]_{w_D} = v^T D w = \sum_{i=1}^n v_i D_{ii} w_{ii} \quad (76)$$

und

$$|v|_D^2 = v^T D v = \sum_{i=1}^n v_i^2 D_{ii} \quad (77)$$

eingeführt.

Die neuen UD-Faktoren \dot{U} und \dot{D} von \dot{D} in Gl. (75) werden rekursiv über die folgenden Schritte für $j=n, n-1, \dots, 1$ berechnet (der Rekursionsindex ist hochgestellt, gegenüber tiefgesetzten Zeilen- oder Spaltenindizes):

$$\dot{d}_{jj} = |w_j^{n-j}|_D^2 \quad (78)$$

$$\dot{u}_{ij} = \frac{1}{\dot{d}_j} [w_i^{n-j}, w_j^{n-j}]_D \quad (79)$$

$$w_i^{n-j+1} = w_i^{n-j} - \dot{u}_{ij} \cdot w_j^{n-j} \quad (80)$$

Eine sehr effiziente FORTRAN-Implementation dieses Algorithmus, unter Benutzung vektorgespeicherter Matrizen, wurde von Thornton und Bierman angegeben. Eine leicht modifizierte Variante dieses Algorithmus gab [Wünsche, 88] an, wobei die Kovarianzmatrix der Systemstörungen Q als reine Diagonalmatrix eingeht. Dadurch ergeben sich weitere laufzeitreduzierende Vereinfachungen. Die Kovarianzmatrix Q der diskreten Systemstörungen wurde hier ebenfalls als konstante Diagonalmatrix angesetzt. Deren Elemente wurden über den Prozeß des sogenannten 'filter tuning' [Maybeck, 79] iterativ-experimentell bestimmt (die Werte der Q -Elemente sind zusammen mit den Anfangswerten der Schätzfehlerkovarianz \dot{P}_0 im Anhang A4 angegeben).

1.4.4.3 Laufzeitoptimierung der UD-Kovarianz-Prädiktion unter Berücksichtigung der Φ -Besetzungsstruktur

Die Transitionsmatrix Φ der Bewegungsgleichungen technischer Systeme kann bei geringer Kopplung der Bewegungsfreiheitsgrade, wie auch im hier beschriebenen Anwendungsfall, blockweise Dreiecksstruktur oder dreiecksähnliche Besetzungsstruktur aufweisen. Dies trifft auch auf zwei weitere Systeme zu, deren Bewegungserfassung mittels Rechnersehen und dem UD-faktoriisierten Filteransatz am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik untersucht wurden: a) das Satelliten-Andockmanöver [Wünsche, 86; 88], und b) die Relativlage-schätzung zu Hindernissen von einem Straßenfahrzeug aus [Christians et al., 89].

Bei Verarbeitung von relativ wenigen Meßwerten durch das Filter, d. h. deren Anzahl entspricht der Systemordnung oder ist noch kleiner, bildet die Kovarianz-Extrapolation den größten geschlossenen (unteilbaren) Rechenzeit-Block innerhalb eines Zeitschritts. Im vorliegenden Fall wurden bei Systemen achter bzw. neunter Ordnung Rechenzeiten von ca. 12 bis 16 ms für die Kovarianz-Extrapolation benötigt (auf 80 386/387, 20 MHz, ohne Wartezyklen), wogegen für die sequentielle Innovation pro Meßwert nur 2,3 bis 2,7 ms erforderlich sind. Bei einer Gesamtzykluszeit von 40 ms (zwei Bildtakte bei 50 Hz Bildfrequenz) stellt dies einen signifikanten Anteil der zur Verfügung stehenden Rechenzeit dar.

In weiterführenden Untersuchungen von Anwendungen des UD-faktoriisierten Ansatzes wurde von [Bierman, 81] u. a. auf die Möglichkeit hingewiesen, Blockdreiecksstrukturen der Transitionsmatrix zur Laufzeitverbesserung bei der Kovarianz-Prädiktion zu berücksichtigen. Wegen des oben erwähnten hohen Rechenzeitbedarfs relativ zur Gesamtzykluszeit, und da die Transitionsmatrix hier unterhalb der Diagonalen weitgehend unbesetzt ist, wurde diese Eigenschaft der Besetzungsstruktur von Φ zur weiteren Reduzierung des Rechenaufwandes genutzt. Hierbei können unbesetzte Bereiche unterhalb der Diagonalen zeilenweise berücksichtigt werden.

Die Transitionsmatrix Φ des Gesamtsystems der Fahrzeugquerdynamik und der Fahrbahnkrümmungsdynamik (vgl. Anhang A3) weist hier folgende Besetzungsstruktur auf:

Bild 10:

Die Besetzungsstruktur der Transitionsmatrix des Fahrbahnerfassungsmoduls

X	0	0	0	0	0	0	0	0
X	X	0	0	0	0	0	0	0
X	X	X	X	X	X	X	0	0
X	0	0	X	X	X	X	0	0
0	0	0	0	X	X	X	0	0
0	0	0	0	0	X	X	0	0
0	0	0	0	0	0	X	0	0
0	0	0	0	0	0	0	X	X
0	0	0	0	0	0	0	0	X

Hierbei sind von $n^2=81$ Elementen $k_{nz}=24$ ungleich Null (Anteil $\lambda_{nz}=k_{nz}/n^2=30\%$) bzw. unterhalb der Diagonale sind $l_z=32$ unbesetzt (Anteil $\lambda_{lz}=l_z/n^2=40\%$). Zum Vergleich seien auch die entsprechenden Besetzungsdichten der oben erwähnten Anwendungen angegeben:

System	λ_{nz}	λ_{tz}
Fahrzeug/Fahrbahn	30%	40%
a) Satellitendocking	23%	42%
b) Fahrzeug/Hindernis	16%	44%

Die dünne Besetzungsdichte λ_{nz} wird bereits im 'sparse Φ multiplication' Algorithmus von [Thornton u. Bierman, 80] bei der Berechnung von $W = \Phi U$ genutzt, um die Anzahl der Gleitkomma-Operationen des Typs $A := A + B \cdot C$ proportional zur Besetzungsdichte λ_{nz} zu reduzieren.

Im ursprünglich angegebenen Algorithmus wird jedoch im darauffolgenden Schritt (Gl. (75)) der neuerlichen Faktorisierung über den 'modifizierten Gram-Schmidt Algorithmus' die von Φ auf W übertragene Besetzungsstruktur noch nicht berücksichtigt. Wegen der oberen Dreiecksform von U bleibt nämlich bei der Matrixmultiplikation $W = \Phi U$ die Besetzungsstruktur von Φ erhalten.

Im Gram-Schmidt Algorithmus werden innerhalb einer zweifach geschachtelten Schleife (vgl. Gl. (79)) aus Zeilenvektoren von W die gewichteten Skalarprodukte der Art $[\tilde{w}_i, w_j]_D$ gebildet. Die zur Skalarproduktberechnung nötigen Operationen, in einer dreifach geschachtelten Schleife ausgeführt, werden also proportional n^3 wiederholt. Hierbei werden die Zeilenvektoren w_i elementweise von links nach rechts verarbeitet. Da W die gleiche Besetzungsstruktur wie Φ besitzt (vgl. Bild 10), die ersten n_{si} Elemente jeder Zeile von W gleich Null sind und somit keinen Beitrag zum Skalarprodukt liefern, können pro i -ter Zeile von W jeweils n_{si} Schleifendurchläufe in Gl. (78) und (79) weggelassen werden.

Daraus resultiert eine signifikante Verringerung der Rechenzeit für die UD-Kovarianz-Prädiktion, die bei den gegebenen Systemordnungen etwa proportional zum Anteil der Nullelemente unterhalb der Diagonalen in Φ ist, hier also ca. 40% beträgt (bei höheren Systemordnungen aber noch größer sein kann). Die Laufzeiten der Kovarianz-Prädiktion für ein System achter Ordnung konnten damit von 11,8 auf 6,9 ms reduziert werden, für ein System neunter Ordnung von 15,8 auf 9,6 ms.

Gegenüber der Algorithmusversion nach Bierman, die in [Wünsche, 88] angegeben ist, mußten als Änderungen nur ein weiteres Indexarray der Dimension n als Übergabeparameter eingeführt werden, sowie die Startwerte zweier Schleifenindexvariablen von 1 auf n_{si} gesetzt werden. Das Indexarray enthält die Spaltenindizes des jeweils ersten nichtverschwindenden Elementes einer Transitionsmatrixzeile. Insgesamt wurden damit nur drei Statements modifiziert um obige Laufzeitbesserung zu realisieren.

Anhang A1 zu Abschnitt 1.2.3

Die Elemente der Jacobischen Matrix der Meßgleichungen

Die Abbildungsgleichung Gl. (12) läßt sich verallgemeinert als Funktion g_i des Zustandsvektors x und der im Vektor p_i zusammengefaßten Abbildungsparameter (c_{yAbb}, L_i, d, ψ_K) darstellen als

$$y_{Bi} = g_i(x, p_i), \quad (A 1.1)$$

bzw. vektoriell geschrieben

$$y_B = g(x, p), \quad (A 1.2)$$

Hierbei ist y_B der Vektor der (bis zu 8 verwerteten) horizontalen Bildkoordinaten der Fahrbahnbegrenzungen an verschiedenen Vorausschauentfernungen L_i .

Die Meßmatrix C gibt im Fall nichtlinearer Abbildungsbeziehungen den linearisierten Zusammenhang zwischen einer (kleinen) Änderung des Zustandes Δx um den aktuellen Zustand x_0 und der entsprechenden Verschiebung der Merkmalskoordinaten Δy_B im Bild an. Sie ist die Jacobische Matrix der Abbildungsgleichungen, d. h. die Matrix der partiellen Ableitungen der Elemente von g nach den Elementen des Zustandsvektors x :

$$C = \left. \frac{\partial g(x, p)}{\partial x} \right|_{x_0}, \quad (A 1.3)$$

$$\Delta y_B = C \cdot \Delta x. \quad (A 1.4)$$

Für das dynamische Modell mit Horizontalkrümmungserkennung und Fahrbahnbreitenschätzung (d. h. für den Fall einer ebenen Fahrbahn) enthält der Zustandsvektor die Elemente

$$x^T = (\xi, \beta, \gamma_v, \psi_v, c_{0hm}, c_{1hm}, c_{1h}, b). \quad (A 1.5)$$

Die Zustandsgrößen λ , β und c_{1h} gehen nicht in die Abbildungsbeziehungen Gl. (12) ein. Damit ergibt sich für die i -te Zeile c_i (bzgl. des i -ten Bildkoordinaten-Meßwerts) der Meßmatrix C :

$$c_i = c_{y_{abb}} \left(0 \left| 0 \right| - \frac{1}{L_i} \left| - \frac{L_i + d}{L_i} \right| \left| \frac{(L_i + d)^2}{2 L_i} \right| \left| \frac{(L_i + d)^3}{6 L_i} \right| 0 \left| \pm \frac{b}{2} \right| \right), \quad (A 1.6)$$

5 wobei $+b/2$ für Bildkoordinaten-Meßwerte der rechten und $-b/2$ für solche der linken Fahrbahnbegrenzung gilt.

Für das dynamische Modell zur Erfassung des räumlichen Fahrbahnverlaufes, d. h. mit Vertikalkrümmungserkennung, enthält der Zustandsvektor die Elemente

$$10 \quad x^T = (\lambda, \beta, y_v, \psi_v, c_{0hm}, c_{1hm}, c_{1v}, c_{0vm}, c_{1vm}). \quad (A 1.7)$$

Hierbei ist die Vorausschauentfernung L abhängig von den Vertikalkrümmungsgrößen c_{0vm} und c_{1vm} , d. h. abhängig vom aktuellen Zustand x_0 (vgl. vertikale Abbildungsgeometrie, Abschnitt 5.2.4). Die i -te Zeile c_i (bzgl. 15 des i -ten Bildkoordinaten-Meßwerts y_{Bi}) der Jacobischen Matrix C der Meßgleichungen lautet hierfür:

$$c_i = c_{y_{abb}} \left(0 \left| 0 \right| - \frac{1}{L_i} \left| - \frac{L_i + d}{L_i} \right| \left| \frac{(L_i + d)^2}{2 L_i} \right| \left| \frac{(L_i + d)^3}{6 L_i} \right| 0 \left| \frac{\partial y_{Bi}}{\partial c_{0vm}} \right| \left| \frac{\partial y_{Bi}}{\partial c_{1vm}} \right| \right), \quad (A 1.8)$$

20 Eine analytische Differentiation der Abbildungsgleichung Gl. (12) nach den Vertikalkrümmungszuständen c_{0vm} und c_{1vm} ist nicht mehr möglich, da für die Abhängigkeit der Vorausschauweite L von den Vertikalkrümmungszuständen kein analytischer Ausdruck vorliegt. Die partiellen Ableitungen $\partial y_{Bi} / \partial c_{0vm}$ bzw. $\partial y_{Bi} / \partial c_{1vm}$ zum aktuellen Zustand x_0 werden dann über numerische Differentiation bestimmt via

$$25 \quad \frac{\partial y_{Bi}}{\partial c_{0vm}} \bigg|_{x_0} = \frac{\Delta y_{Bi}}{\Delta c_{0vm}} \bigg|_{x_0} = \frac{y_{Bi}(x_0, c_{0vm} + \epsilon_{cv}) - y_{Bi}(x_0, c_{0vm} - \epsilon_{cv})}{2 \epsilon_{cv}} \quad (A 1.9)$$

30 und

$$\frac{\partial y_{Bi}}{\partial c_{1vm}} \bigg|_{x_0} = \frac{\Delta y_{Bi}}{\Delta c_{1vm}} \bigg|_{x_0} = \frac{y_{Bi}(x_0, c_{1vm} + \epsilon_{cv1}) - y_{Bi}(x_0, c_{1vm} - \epsilon_{cv1})}{2 \epsilon_{cv1}} \quad (A 1.10)$$

35

Anhang A2 zu Abschnitt 1.3

Die Elemente des diskreten Zustandsraummodells

40 Das kontinuierliche Modell der Fahrzeugseitenbewegung bzw. der Fahrbahnkrümmungsdynamik (Gl. (54)) ist von der Fahrgeschwindigkeit v als auch evtl. von der Vorausschauweite L abhängig. Die Elemente der Transitionsmatrix Φ und des diskreten Stellverstärkungsvektors g müssen daher zu jedem Abtastzeitpunkt neu berechnet werden. D. h. für diese Größen müssen entsprechende analytische Ausdrücke vorliegen. Innerhalb eines Abtastschrittes werden L und v als konstant angenommen.

45 Über die Laplace-Transformation lassen sich die Elemente der Transitionsmatrix in analytischer Form aus der kontinuierlichen Systemmatrix herleiten (vgl. [Ackermann, 83]):

$$\Phi(T) = L^{-1} ((sI - A)^{-1}). \quad (A 2.1)$$

50

Für den diskreten Eingangsverstärkungsvektor g abhängig von Φ und b gilt

$$55 \quad g = \int_0^T \Phi(\tau) b \, d\tau. \quad (A 2.2)$$

Aus dem kontinuierlichen Zustandsraummodell A, b ergibt sich damit die entsprechende diskrete Darstellung zu:

60

65

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & 1 & \varphi_{34} & \varphi_{35} & \varphi_{36} & \varphi_{37} & 0 & 0 \\ \varphi_{41} & 0 & 0 & 1 & \varphi_{45} & \varphi_{46} & \varphi_{47} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \varphi_{56} & \varphi_{57} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \varphi_{66} & \varphi_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \varphi_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und } g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A 2.3})$$

Für die Modellvariante mit Fahrbahnbreitenschätzung anstelle der Vertikalkrümmungserkennung ist in der obigen Transitionsmatrix nur die letzte Spalte bzw. Zeile zu streichen; ansonsten bestehen keine Unterschiede in den diskreten Formen der dynamischen Modelle.

Mit den Faktoren

$$c_F = \frac{v}{a_{\text{Achse}}},$$

$$a_F = 2 \left(-\frac{k_r}{m \cdot v} \right),$$

$$b_F = -\frac{k_r}{m \cdot v} + c_F \text{ und}$$

$$a_c = -3 \frac{v}{L}$$

ergeben sich für die nichtverschwindenden bzw. nichttrivialen Elemente der Transitionsmatrix folgende Terme:

2. Zeile

$$\varphi_{21} = \frac{b_F}{a_F} (e^{a_F T} - 1); \quad \varphi_{22} = e^{a_F T};$$

3. Zeile

$$\varphi_{31} = \frac{b_F v}{a_F} \left(\frac{e^{a_F T} - 1}{a_F} - T \right) + \frac{c_F v T^2}{2}; \quad \varphi_{32} = \frac{v}{a_F} (e^{a_F T} - 1);$$

$$\varphi_{34} = v T; \quad \varphi_{35} = -\frac{v^2 T^2}{2}; \quad \varphi_{36} = v^3 \left(\frac{1 - e^{a_c T}}{a_c^3} + \frac{T}{a_c^2} + \frac{T^2}{2 a_c} \right);$$

$$\varphi_{37} = v^3 \left(-\frac{1 - e^{a_c T}}{a_c^3} - \frac{T}{a_c^2} - \frac{T^2}{2 a_c} - \frac{T^3}{6} \right);$$

4. Zeile

$$\varphi_{41} = c_F T; \quad \varphi_{45} = -v T; \quad \varphi_{46} = \frac{v^2}{a_c^2} (a_c T + 1 - e^{a_c T});$$

$$\varphi_{47} = -v^2 a_c \left(\frac{1 - e^{a_c T}}{a_c^3} + \frac{T}{a_c^2} + \frac{T^2}{2 a_c} \right);$$

5. Zeile

$$\varphi_{56} = -\frac{v}{a_c}(1 - e^{a_c T}); \quad \varphi_{57} = \frac{v}{a_c}(a_c T + 1 - e^{a_c T});$$

6. Zeile

$$\varphi_{66} = e^{a_c T}; \quad \varphi_{67} = 1 - e^{a_c T};$$

8. Zeile

$$\varphi_{89} = v T.$$

Die Ausdrücke für die nichtverschwindenden Elemente des diskreten Eingangsverstärkungsvektors g lauten:

$$g_1 = T,$$

$$g_2 = \frac{b_F}{a_F} \left(\frac{e^{a_F T} - 1}{a_F} - T \right),$$

$$g_3 = -\frac{b_F v}{a_F^2} \left(T + \frac{a_F T^2}{2} - \frac{e^{a_F T} - 1}{a_F} \right) + \frac{c_F v T^3}{6} \quad \text{und}$$

$$g_4 = \frac{c_F T^2}{2}.$$

Anhang A3 zu Abschnitt 1.4.4.1

Die Elemente der Meßfehler-Kovarianzmatrix R

Für die Varianzen der Meßfehler, die als unkorreliert angenommen werden,

$$R = \text{Diag}(r_i) = \text{Diag}(\sigma_\lambda^2, \sigma_{y_{B1}}^2, \sigma_{y_{B2}}^2, \dots, \sigma_{y_{B8}}^2)$$

wurden im Fahrbahnerfassungsmodul folgende Werte angesetzt:

$$\sigma_\lambda^2 = 1,0E-6 [\text{rad}^2] \text{ bzw. } \sigma_{y_{Bi}}^2 = 5,0 [\text{px}^2].$$

Die Streuung des Lenkwinkelmeßwerts $\sigma_\lambda = 1,0E-3 [\text{rad}] \approx 0,057^\circ$ entspricht somit etwa einem viertelten Quantisierungsschritt des mit $0,24^\circ$ Auflösung digitalisierten Lenkwinkels. Für die Streuung der Kantenkoordinatenmeßwerte in natürlichen Straßenszenen wurde $\sigma_{y_{Bi}} \approx 2,24 [\text{px}]$ angesetzt, womit auch einer gewissen Kanten-'Unschärfe' von nicht markierten, unregelmäßigen Fahrbahnbegrenzungen, wie z. B. bei einem direkten Übergang von Asphalt zu Gras, Rechnung getragen wird.

Anhang A4 zu Abschnitt 1.4.4.2

Die Elemente der Systemstörungen-Kovarianzmatrix Q und die Anfangswerte der Schätzfehlerkovarianzmatrix P_0

Die Kovarianzmatrix Q der diskreten Systemstörungen wurde für das Fahrbahnerfassungsmodul als konstante Diagonalmatrix angesetzt. Deren Elemente wurden über den Prozeß des sogenannten 'filter tuning' [Maybeck, 79] iterativ-experimentell bestimmt zu

$$Q = \text{Diag}(1.E-7, 1.E-5, 1.E-4, 1.E-7, 1.E-9, 1.E-11, 1.E-10, 3.E-9, 1.E-10). \quad (\text{A } 4.1)$$

Die dabei gemachten Vereinfachungen, d. h. die Vernachlässigung der Nebendiagonalelemente sowie der Geschwindigkeitsabhängigkeit, erwiesen sich aus folgenden Gründen als sinnvoll und zulässig:

- In der Praxis hat sich ein konstantes, diagonales Q bewährt.
- Die numerische Berechnung von Q (diskret) aus einem kontinuierlichen, diagonalen \underline{Q} über die Integration

$$Q = \int_0^T \Phi(v, \tau) Q \Phi'(v, \tau) d\tau \quad (A 4.2)$$

(vgl. [Brammer u. Siffling, 75, pp. 93 ff]) ergab schon eine deutliche Diagonaldominanz der Elemente von Q .

Darüber hinaus würde eine explizite on-line Berechnung von Q über obige Beziehung selbst bei Vernachlässigung aller Terme mit höheren Potenzen als T^2 einen nicht unerheblichen Rechenmehraufwand für die Kovarianz-Prädiktion bedeuten.

Im Gegensatz zu Q und R , welche das 'langfristige' Filterverhalten beeinflussen, wird durch die Anfangsschätzfehlerkovarianz \dot{P}_0 hauptsächlich das Einschwingverhalten bestimmt. Als günstige Wahl für schnelles Einschwingen erwies sich die Besetzung

$$\dot{P}_0 = \text{Diag} \{0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0\}, \quad (A 4.3)$$

d. h. die Anfangswerte des Schwimmwinkels sowie der Krümmungsänderungen (im Stand) werden als exakt angesehen. Mit \dot{P}_0 als Diagonalmatrix gilt zusätzlich

$$\dot{D}_0 = \dot{P}_0 \text{ sowie } \dot{U}_0 = I, \quad (A 4.4)$$

womit sich also eine anfängliche Zerlegung von \dot{P}_0 erübrigt.

Literatur

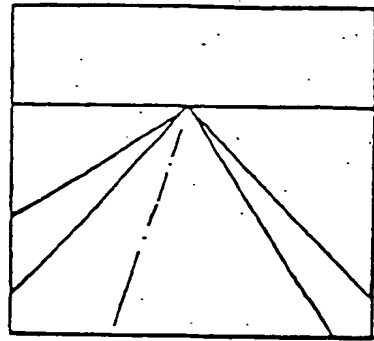
- [Andrews, 68] A. Andrews: A Square Root Formulation of the Kalman Covariance Equations, AIAA Journal Vol. 6, No. 6, 1968, pp. 1165—1166.
- [Bierman, 77] G. J. Bierman: Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation. Academic Press, New York, 1977.
- [Bierman, 81] G. J. Biermann: Efficient Time Propagation of U-D Covariance Factors. IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-4, Nr. 4, Aug. 1981, pp. 890—894.
- [Christians et al., 89] T. Christians, H. J. Wünsche, E. D. Dickmanns: Räumliche Relativlageschätzung von Objekten (in einer Ebene) durch Rechnersehen. Interner Bericht am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik der Universität der Bundeswehr München, LRT/WE 13/IB/89-6, April 1989.
- [Chui u. Chen, 87] C. K. Chui, G. Chen: Kalman Filtering with Real-Time Applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
- [Dickmanns, 87] E. D. Dickmanns: 4D-Szenenanalyse mit integralen raum-/zeitlichen Modellen. In Paulus (Hrsg.): 9.DAGM-Symposium Mustererkennung, Braunschweig; Informatik Fachberichte 149, Springer-Verlag, Sept./Okt. 1987.
- [Dickmanns, 88] E. D. Dickmanns: Dynamic Computer Vision for Mobile Robot Control. Proc. Int. Symposium on Robot Control, Sydney, Nov. 1988.
- [Dickmanns u. Zapp, 86] E. D. Dickmanns, A. Zapp: A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision. Proc. SPIE Conf. on Mobile Robots, Vol. 727, Cambridge, MA, USA, 1986, pp. 161—168.
- [Donges, 78] E. Donges: Der Fahr Simulator des Forschungsinstitutes für Anthropotechnik. Forschungsbericht Nr. 41, FGAN e. V., Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Wachtberg-Werthhoven, Juli 1978.
- [Heinhold u. Behringer, 76] J. Heinhold, F. Behringer: Einführung in die Höhere Mathematik, Teil 2: Infinitesimalrechnung. Carl Hanser Verlag, 1976.
- [Isermann u. Nold, 88] R. Isermann, S. Nold: Wissensbasierte Fehlerdiagnose Technischer Prozesse. Proc. ProzeßRechensysteme 88, Informatik-Fachberichte 167, R. Lauber (Hrsg.), Stuttgart, 1988, pp. 738—748.
- [Maybeck, 79] P. S. Maybeck: Stochastic Models, Estimation and Control. Vol. 1. Academic Press, 1979.
- [Mitschke, 72] M. Mitschke: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972.
- [Ozawa, Rosenfeld, 86] S. Ozawa, A. Rosenfeld: Synthesis of a road image as seen from a vehicle, Pattern Recognition, Vol. 19, No. 2, 1985, S. 123—145.
- [RAS-L-1, 84] Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Linienführung, Abschnitt 1: Elemente der Linienführung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) Köln, Ausgabe 1984.
- [Sakurai et al., 87] K. Sakurai, H. Zen, H. Ohta, Y. Ushioda, S. Ozawa: Analysis of a road image as seen from a vehicle. Proc. 1st ICCV, London, 1987, pp. 651—656.
- [Stewart, 73] G. W. Stewart: Introduction to Matrix Computations. Academic Press, 1973.
- [Thornton u. Bierman, 80] C. L. Thornton, G. J. Bierman: UDU^T Covariance Factorization for Kalman Filtering. In: Control and Dynamic Systems, Advances in Theory and Application, Vol. 16, Academic Press, New York, 1980, pp. 178—248.
- [Wünsche, 86] H. J. Wünsche: Detection and Control of Mobile Robot Motion by Real-Time Computer Vision. Proc. SPIE Conf. on Mobile Robots Vol. 727, Cambridge, MA, USA, Oct. 1986, pp. 100—109.
- [Wünsche, 88] H. J. Wünsche: Bewegungssteuerung durch Rechnersehen. Fachberichte Messen, Steuern, Regeln Bd. 20, Springer-Verlag, Berlin 1988.
- [Zapp, 88] A. Zapp: Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen. Dissertation an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München, 1988.

Patentansprüche

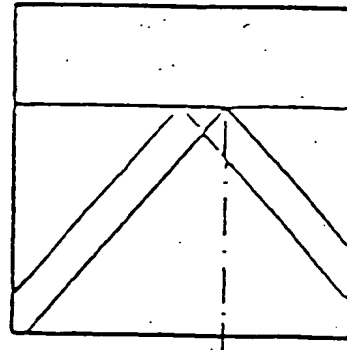
1. Verfahren zur kontinuierlichen und automatischen Fahrzeugorientierung auf einer Fahrbahn mit einem bilderzeugenden System und einer computerisierten Bildauswertung zur Erzeugung von Fahrzeugsteuerdaten, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Bilddaten eines letzten monokular erzeugten Bildes einer fortlaufenden Bildfolge mit Hilfe eines einen elektronischen Rechner steuernden Programms, orientiert an räumlich-geometrischen und zeitlich-dynamischen Aspekten einer Szene, modelliert werden, um sie dann mittels rekursiver Schätzverfahren zur Bestimmung der Straßenparameter, speziell des horizontalen und des vertikalen Krümmungsverlaufs im Vorausschaubereich sowie der Breite und der eigenen straßenbezogenen Situation heranzuziehen.

2. Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß ein kompletter Verfahrenszyklus inklusive einer Aktualisierung der Steuerdaten 1/10 bis 1/30 Sekunden dauert.

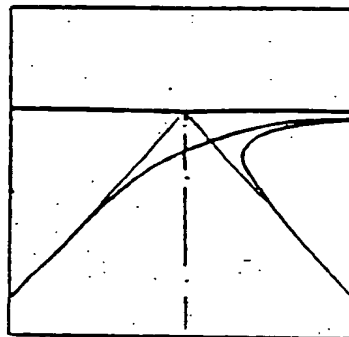
Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen



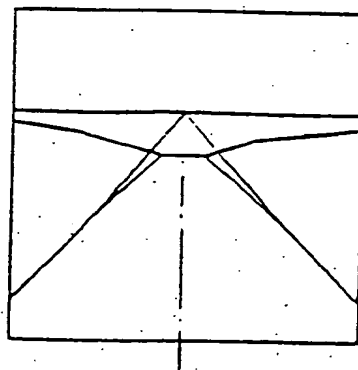
a)



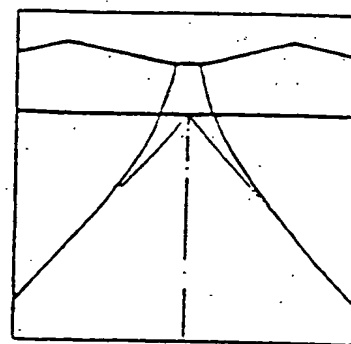
b)



c)



d)



e)

Bild 1

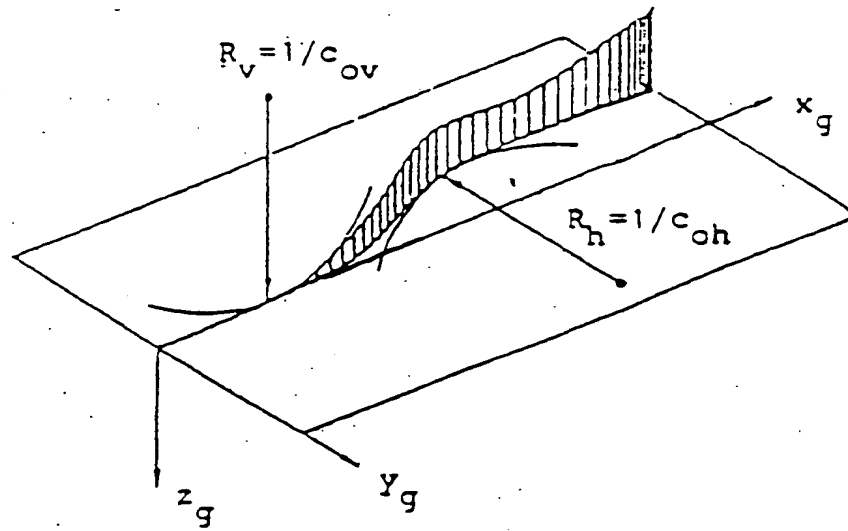


Bild 2

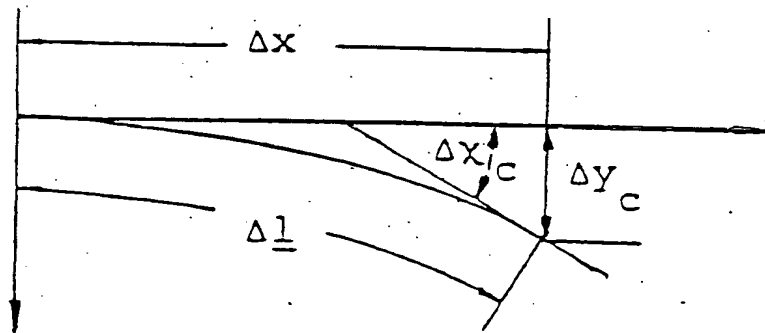


Bild 3

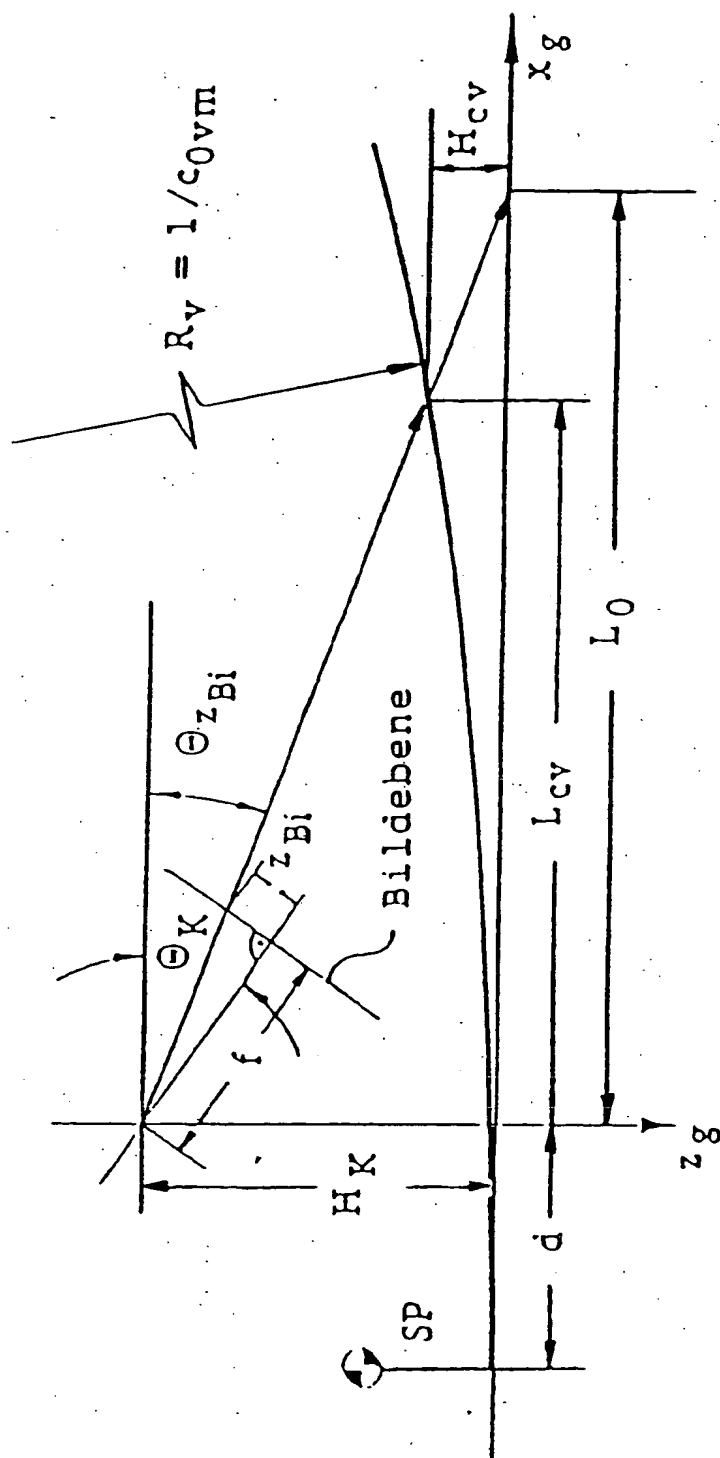


Bild 5

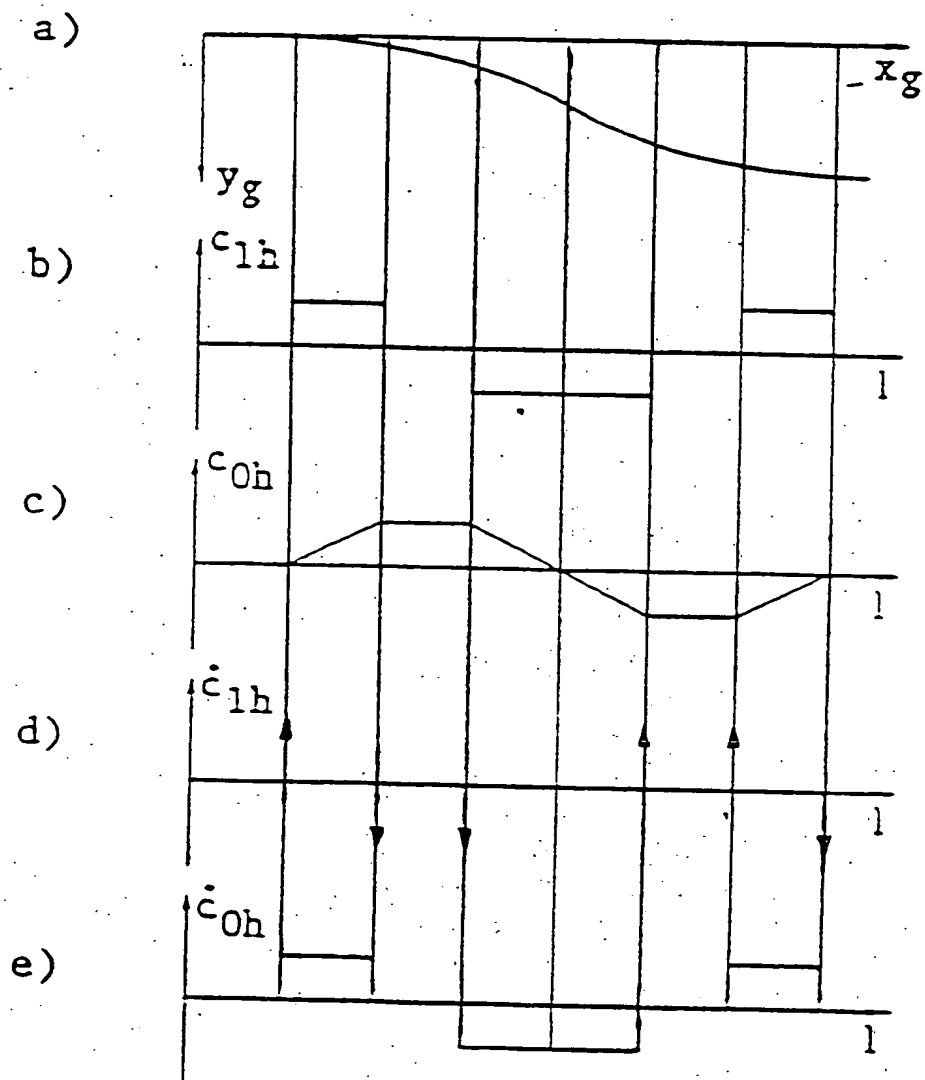


Bild 6

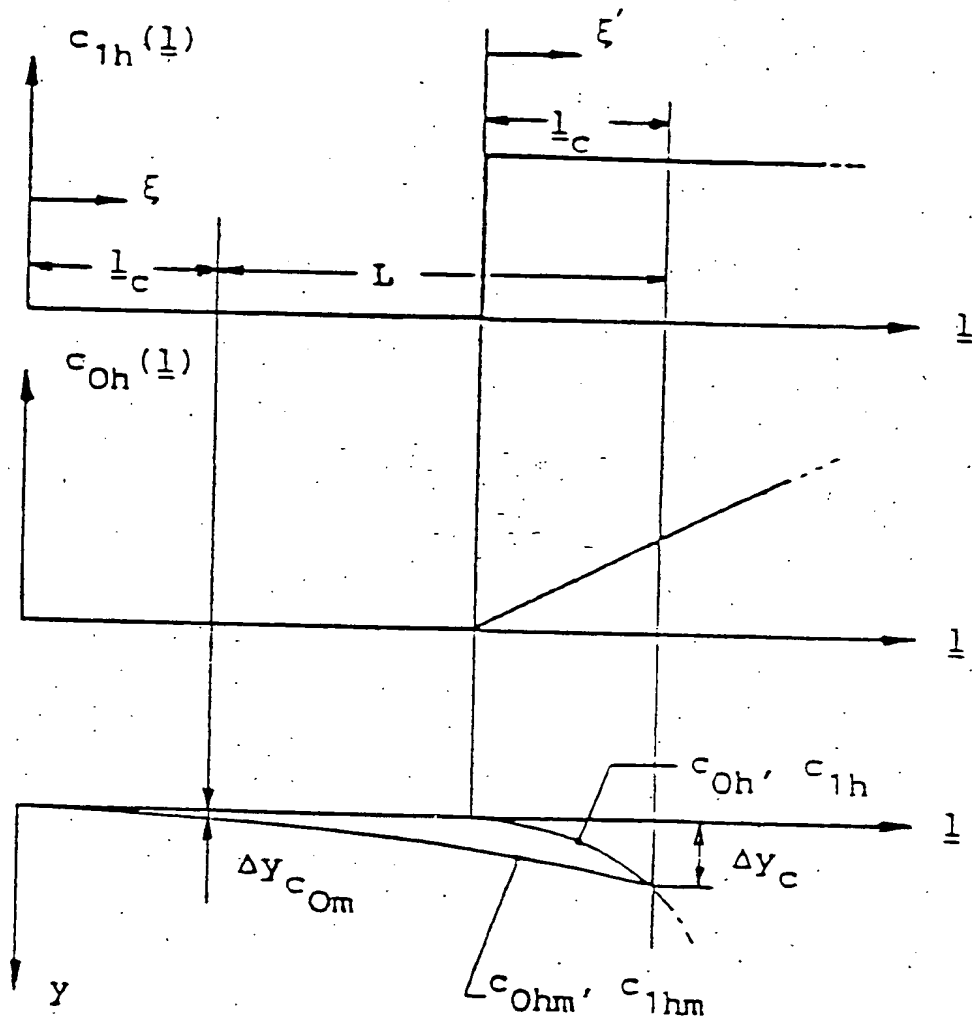


Bild 7

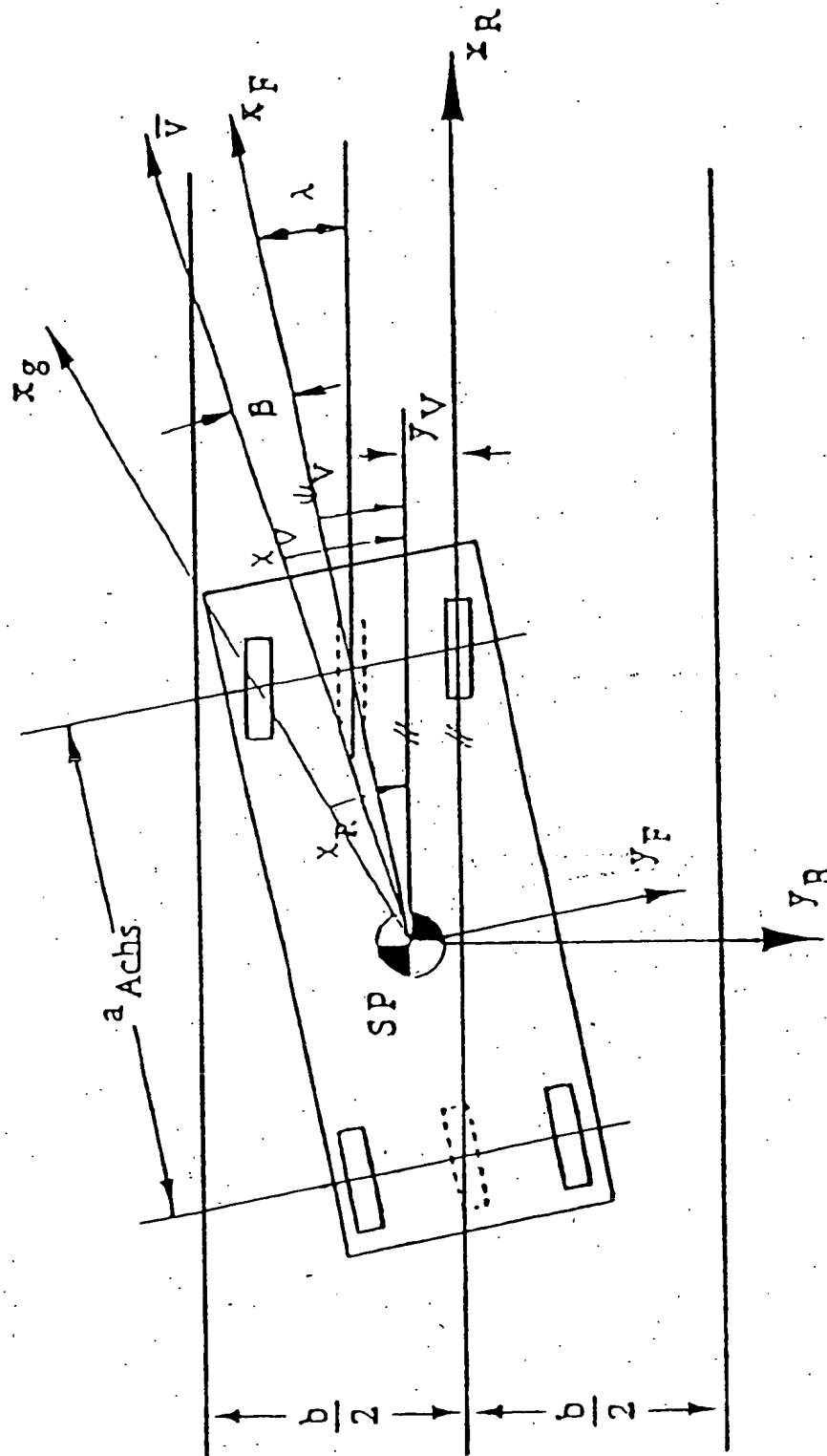


Bild 8

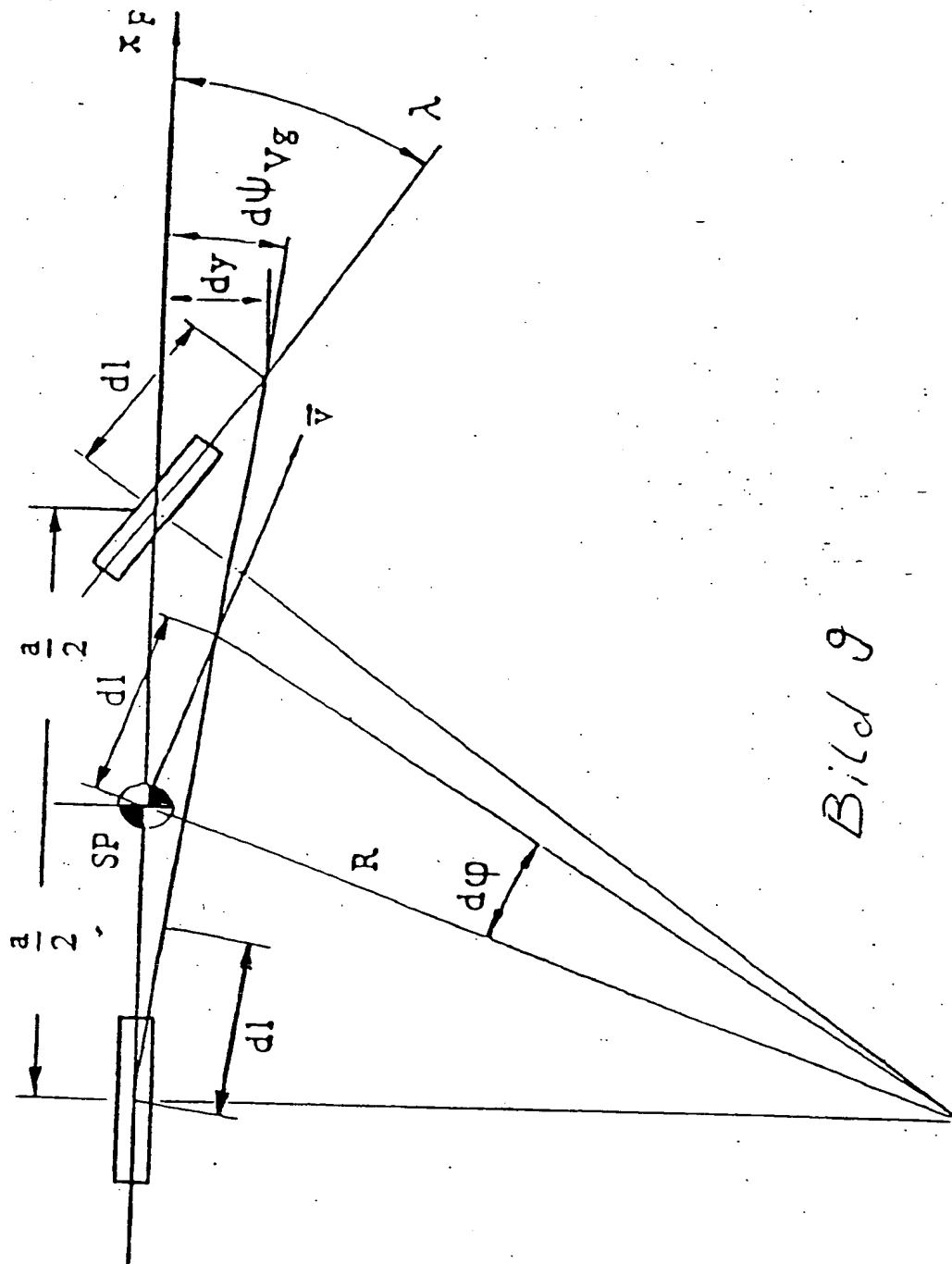


Bild 9

AB DE 4124654 A UPAB: 19930924

The method involves using an image generating system and a computerised image processor to produce vehicle control data. The image data of one monocular image of a sequence of images is modelled by orientation with spatially geometrical and temporally dynamic aspects of a scene, using a program-controlled computer.

A recursive estimation procedure is used to determine the road parameters, i.e. the predicted horizontal and vertical curve paths, as well as the road width and the characteristic road situation. A complete cycle of the procedure, including the utilisation of the control data, pref. lasts 1/10 to 1/30 of a second.

USE/ADVANTAGE - For automatic vehicle guidance. Interprets monocular image data from camera mounted on vehicle, for determination of road course.

2/9

This Page Blank (uspto)